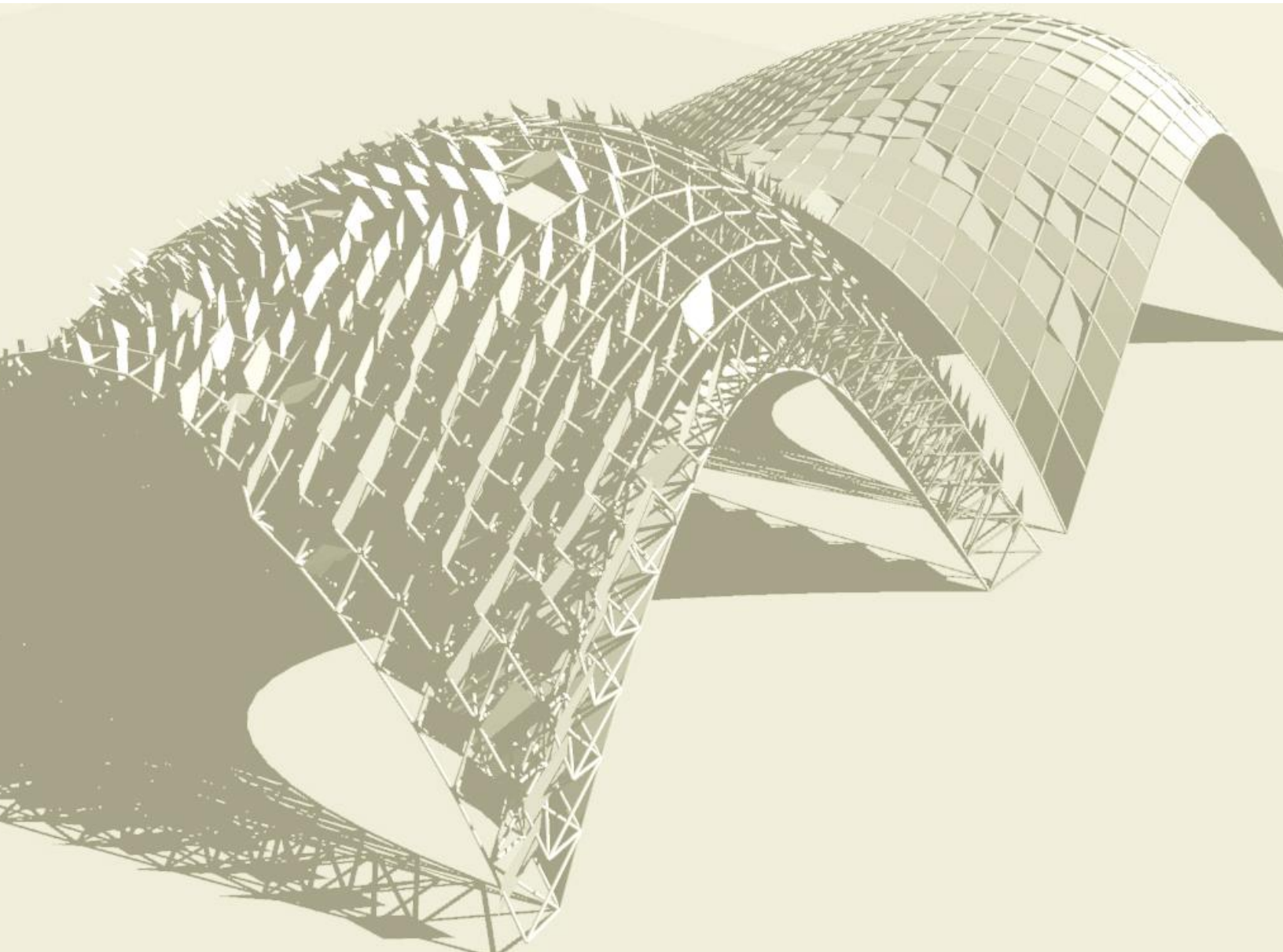


ELS SISTEMES CINÈTICS COM A EINA DE DISSENY EN ARQUITECTURA

ESTUDI DEL POTENCIAL FORMAL I DE CONTROL GEOMÈTRIC

Joaquim Moya Sala

Tesi doctoral



PROGRAMA DE DOCTORAT EN COMUNICACIÓ VISUAL EN ARQUITECTURA I DISSENY

PROGRAMA DE DOCTORAT EN COMUNICACIÓ VISUAL EN ARQUITECTURA I DISSENY

Departament d'Expressió Gràfica Arquitectònica I, Universitat Politècnica de Catalunya

Director de tesi: Javier Monedero Isorna

Doctorant: Joaquim Moya Sala

ELS SISTEMES CINÈTICS COM A EINA DE DISSENY EN ARQUITECTURA

ESTUDI DEL POTENCIAL FORMAL I DE CONTROL GEOMÈTRIC

Índex.....	1
1 Introducció	7
1.1 Conceptes previs	8
1.1.1 Comparació amb l'ús informàtic en disciplines similars.....	8
1.1.2 Necessitats específiques de l'arquitecte respecte d'altres professions.....	10
1.1.3 Els sistemes físics de simulació com a possible resposta.....	11
1.2 Objectius de la tesi.....	14
1.2.1 El control geomètric a través d'elements dinàmics.....	16
1.2.2 Processos d'optimització	18
1.2.3 Estudi dels models dinàmics	20
1.3 Metodologia general d'estudi de la tesi.....	21
1.3.1 Procés d'investigació.....	21
1.3.2 Anàlisi dels resultats.....	22
1.3.3 Del que és general al que és específic?	23
1.4 Programa de simulació dinàmica	24
1.4.1 Idees prèvies.....	27
1.4.2 Integració dels processos dinàmics en un CAD	30
1.4.3 Estratègia de càlcul i de modelatge	33
1.4.4 Introducció de dades	35
2 Estat actual de la qüestió	41
2.1 Fets rellevats en l'ús de mecanismes físics de disseny	41
2.1.1 El teorema de la catenària inversa	41
2.1.2 Aportacions del segle XIX i l'estàtica gràfica.....	43
2.1.3 Alguns arquitectes del segle XX que s'han basat en mecanismes físics	44
2.1.4 Conclusió	54
2.2 Exemples de programari arquitectònic basat en mecanismes físics.....	56
2.2.1 Kangaroo.....	57
2.2.2 CADenary Tools	60
2.2.3 Programes de force-density.....	64
2.2.4 Altres aportacions.....	67
2.2.5 Conclusions.....	69
2.3 Fets rellevats en la computació de fenòmens físics	70

2.3.1	Inicis de la simulació.....	71
2.3.2	Gràfics i animació.....	75
2.3.3	Estat actual	79
2.3.4	Classificació dels sistemes de simulació física	81
2.3.5	Càlcul per passos finits o diferencials	82
2.3.6	Càlcul directe	84
2.3.7	Càlcul d'elements finits	85
2.3.8	Càlcul de volums finits	88
2.3.9	Models de partícules	92
2.3.10	Simulacions de fluids amb partícules.....	99
2.3.11	Sistemes tàctils o hàptics	102
2.3.12	Conclusió	103
2.4	Exemples de mòduls d'animació actuals	104
2.4.1	Lagoa multiphysics	105
2.4.2	emFlock	107
2.4.3	PhysX	108
3	Programa d'aplicació dinàmica	113
3.1	El llenguatge de programació	113
3.2	Descripció dels elements bàsics de la simulació i funcionament intern	116
3.2.1	La partícula	116
3.2.2	La barra.....	124
3.2.3	Forces basades en el pla.....	130
3.2.4	Forces angulars.....	135
3.2.5	Longituds iguals entre rectes	139
3.2.6	Corbes NURBS	141
3.2.7	Superfícies NURBS	148
3.3	Eines i procediments bàsics de control dinàmic.....	153
3.3.1	Control de la intensitat de camp	155
3.3.2	Fixació dels punts.....	156
3.3.3	Afegir/eliminar elements d'un camp de força	156
3.3.4	Control de partícules	157
3.3.5	Control de les barres	161
3.3.6	Control de les forces del pla	163
3.3.7	Control de les forces angulars	166
3.3.8	Control de les forces d'atracció a NURBS	167
3.4	Descripció d'elements combinats.....	169
3.4.1	Superfícies mallades	170
3.4.2	Volums mallats.....	174
3.5	Procediments bàsics d'edició de malles.....	176
3.5.1	Vores.....	177

3.5.2	Forats	179
3.5.3	NURBS	180
3.6	Eines i procediments bàsics de modelatge convencional	181
3.6.1	Fusió de punts	182
3.6.2	Intersecció	182
3.6.3	Generació de malles quadrades de contorn lliure	183
3.6.4	Generació automàtica de plans	184
3.6.5	Extrusió	184
4	Estudi de disseny bàsic amb camps de força.....	187
4.1	Cables de catenària	188
4.1.1	Cables de corda rígida i de corda elàstica	189
4.1.2	Cables vinculats a NURBS	190
4.1.3	Cables amb comportaments heterogenis.....	191
4.1.4	Generació de cables combinats.....	192
4.1.5	Conclusions.....	192
4.2	Extrapolació a estructures de 3 dimensions	193
4.3	Malles compostes de partícules i cables.....	194
4.3.1	Malles de cordes rígides.....	197
4.3.2	Malles amb cordes tènsils	198
4.3.3	Malles de comportament tensional irregular	199
4.3.4	Cel·la quadrada	200
4.3.5	Cel·la hexagonal.....	202
4.3.6	Cel·les heterogènies.....	206
4.4	Malles amb sistemes de panells	210
4.4.1	Panells sobre malles quadrades	212
4.4.2	Panells sobre malles hexagonals	219
4.4.3	Panells sobre malles lliures	223
4.4.4	Panells amb angles fixats	225
4.4.5	Malla hexagonal amb angles fixats	229
4.4.6	Marges d'error en panells	232
4.4.7	Sistema per detectar i igualar panells segons els tipus	233
4.5	Taula resum de combinació de camps de força i geometria resultant	235
5	Estudi de disseny avançat amb camps de força	237
5.1	Introducció	237
5.1.1	Procediment general de modelatge	238
5.1.2	Efectes compositius.....	238
5.2	Malles i fluxos	239
5.2.1	Recorreguts rectes	239

5.2.2	Propietats de composició.....	244
5.2.3	Recorreguts amb corbes NURBS.....	245
5.2.4	Propietats de composició.....	247
5.3	Malles i partícules	249
5.3.1	Sistema per focus d'exclusió	250
5.3.2	Propietats de composició.....	252
5.3.3	Sistema per focus d'atracció.....	254
5.3.4	Propietats de composició.....	258
5.4	Malles i forces.....	259
5.4.1	El vent.....	259
5.4.2	Vent sobre voltes.....	261
5.4.3	Propietats Propietats de composició.....	263
5.4.4	Vent sobre elements volumètrics.....	265
5.4.5	Propietats de composició.....	269
6	Casos d'aplicació dels sistemes dinàmics.....	271
6.1	Disseny conceptual.....	272
6.1.1	Planejat de les cares	274
6.1.2	Estudi de peces similars.....	275
6.1.3	Model final.....	277
6.1.4	Anàlisi del resultat	278
6.2	Panel·lització.....	280
6.2.1	Panells rectangulars regulars	281
6.2.2	Panells hexagonals regulars.....	284
6.2.3	Anàlisi del resultat	287
6.3	Optimització de sistemes tèxtils i malles tènsils.....	288
6.3.1	Malles de barres rígides	289
6.3.2	Malles de superfície mínima	291
6.3.3	Anàlisi del resultat	292
6.4	Altres casos d'aplicació.....	294
6.4.1	Control d'un esquema estructural	294
6.4.2	Control de geometries planes	300
7	Conclusions	305
7.1	Dels objectius inicials de la tesi.....	306
7.1.1	Relació amb l'usuari	306
7.1.2	Capacitat de control de geometries complexes.....	307
7.1.3	Capacitat d'optimització de peces	309
7.1.4	Inclusió de la lògica constructiva	311
7.1.5	Capacitat per fer esbossos amb eines digitals	313

7.2	Altres observacions.....	315
7.2.1	Integració de la computació com a eina de CAD a partir de sistemes dinàmics	315
7.2.2	Similituds amb les formes i processos naturals.....	317
7.3	Futurs desenvolupaments.....	322
7.3.1	Millores en la interfície gràfica	322
7.3.2	Millores en les fórmules	323
7.3.3	Col·lisions.....	324
7.3.4	Desenvolupament dels sistemes de panel·lització	324
7.4	Conclusió.....	325
8	Referències.....	327
8.1	Paraules clau	327
8.2	Bibliografia	327

1 Introducció

Durant les últimes dues dècades tots hem experimentat el ràpid creixement dels sistemes digitals en el nostre entorn. En una fracció de temps que sembla ridícula històricament, aquests sistemes s'han fet completament imprescindibles per a la supervivència de la societat en sectors tan bàsics com els sistemes de transport, els sistemes de comunicació, el sistema bancari, els tràmits burocràtics i, fins i tot, els sistemes de producció de béns. El nivell de dependència que hem adquirit amb els sistemes digitals és tan gran que controlar-ne el funcionament comença a ser una necessitat essencial de cara a encaixar bé el futur de moltes professions. L'augment, tant en intensitat com en àmbits d'aplicació, sembla que no té fi, cada dia descobrim una nova possibilitat d'ús ja sigui pel que fa a computació o en combinació amb altres elements mecànics per millorar el rendiment o, directament, suplantar un humà en una tasca concreta. El gran avantatge que ofereixen aquests mecanismes es basa en la capacitat de transformar la informació i reproduir-la tants cops com faci falta. Generalment, qualsevol tasca mecànica senzilla en l'àmbit intel·lectual es pot delegar a un sistema digital sense la supervisió d'un humà. En aquest sentit, les capacitats dels sistemes digitals no depenen únicament de la tecnologia que s'apliqui al maquinari, sinó més aviat del programari que faci servir, de manera que crear un programa dona a l'ordinador la capacitat de fer una nova tasca i som nosaltres els qui hem de crear els programes segons les nostres necessitats. Una pregunta que abans o després ens haurem de plantejar és "què pot fer la persona que no pugui fer un sistema digital?". Sobre aquest punt cal haver programat per tenir una perspectiva real de la qüestió i, en principi, la meua opinió és que qualsevol activitat mecànica que es mogui en un àmbit més o menys estable (que no es donin situacions inesperades, canvis sobtats, etc.) es pot automatitzar i, per tant, es pot delegar a un sistema digital, i això inclou gran part de les activitats quotidianes i professionals que avui dia encara fan les persones. Per tant, de cara al futur el que restarà per a l'àmbit de la persona seran les decisions i tots aquells aspectes de les activitats humanes que no tenen lloc en un àmbit estable o que no es poden traduir matemàticament i avaluar de manera lògica. Això inclou molts processos cognitius que encara no entenem, els processos artístics, o tots aquells fenòmens pels quals no hem trobat (o no tenen) una formulació matemàtica.

La millor manera, doncs, de no perdre la iniciativa i de recuperar el control de la situació en un món on cada cop més i més decisions es poden automatitzar és dominar la informàtica des de dins, l'eina bàsica amb la qual es generen els sistemes digitals i amb la qual programem els aparells que fem servir. Malauradament, la introducció ha estat tan ràpida que la capacitat de reacció de l'arquitecte que exerceix professionalment ha quedat desbordada i ha perdut gran part

del control que tenia sobre el procés de disseny.¹ Aspectes que van des de la definició tècnica fins al procés de disseny s'han vist alterats per aquest fenomen, que ha posat en crisi moltes estratègies de treball que semblaven indispensables. Segurament, malgrat l'opinió que cadascú pugui tenir, l'ofici s'haurà de reestructurar en funció de les noves eines que s'empren i, per tant, intentar compaginar correctament els sistemes digitals amb les activitats de l'arquitecte serà un dels reptes que hem d'afrontar amb més urgència al segle XXI si els arquitectes volen retenir el control del seu ofici. En cas contrari, l'arquitectura serà possiblement com un vaixell a la deriva que acabarà per naufragar sense remei. És fonamental, doncs, fer un ús òptim de l'eina digital tenint en compte quines tècniques i quins potencials ens ofereix per resoldre els nostres problemes i, a partir d'aquí, replantejar les nostres activitats en harmonia amb aquests sistemes. En aquest sentit s'ubica aquesta tesi, com un estudi i proposta d'ús d'una metodologia informàtica aplicada al camp de l'arquitectura de manera que es pugui fer servir en el procés de disseny amb eficàcia.

1.1 Conceptes previs

1.1.1 Comparació amb l'ús informàtic en disciplines similars

De cara a introduir adequadament la informàtica en el món de l'arquitectura, seria convenient estudiar com ha estat aquesta introducció en altres esferes professionals i, així, poder reflexionar des d'una perspectiva real sobre com podem aplicar aquests mateixos principis a l'àmbit arquitectònic. En molts casos, l'arquitectura comparteix finalitats i fins i tot mètodes amb altres oficis de manera que podem extrapolar fàcilment aquests recursos. Un dels primers camps que cal estudiar és el món de l'enginyeria, que per diverses raons té molta més recerca en aquest àmbit que no pas l'arquitectura. En general, els enginyers treballen amb sistemes paramètrics de modelatge en els quals el model tridimensional no és purament un model geomètric estàtic, sinó un mecanisme dinàmic controlat per paràmetres i que, per tant, es modifica seguint una lògica que no és exclusivament geomètrica. Es tracta de sistemes molt útils per comprovar el funcionament d'una peça, que combinen aspectes programàtics amb solucions geomètriques de manera que poden simular tota mena de moviments, col·lisions, fer servir llibreries predeterminades de peces i avaluar les propietats físiques del seu model. Però per fer tot això cal que les dades s'introdueixin d'una manera determinada, seguint un ordre precís i saber molt clarament què es vol obtenir. Aquests sistemes, doncs, necessiten que l'usuari tingui un

¹ Terzidis, K., *Algorithmic Architecture*, 2006, Elsevier, p. 24.

coneixement previ detallat del model que vol construir per establir les relacions paramètriques adequades i, més tard, poder treballar amb comoditat sobre la peça. Però si per la raó que sigui l'estructura general del model canvia, llavors refer totes les relacions internes pot ser tan complex i llarg que molts cops serà preferible començar de nou. Aquest és un problema que els enginyers trobaran alguns cops, però que els arquitectes ens trobem sistemàticament a les fases inicials, cosa que les exclou de qualsevol procés d'amidaments, de manera que no podem passar per alt aquesta qüestió. Així doncs, són sistemes que es mostren terriblement rígids quan un arquitecte els ha de fer servir en el procés de concepció de la idea. En aquest sentit, necessitem més agilitat.

Els sistemes de fabricació, però, són un aspecte completament diferent del qual certament els arquitectes podrien beneficiar-se del món de l'enginyeria. De fet, hi ha força obres modernes que han usat sistemes de fabricació de la indústria aeronaval per construir part de les seves obres, com és el cas de Buckminster Fuller amb la Dymaxion House o de Frank Gehry amb el Guggenheim de Bilbao.² En aquest aspecte, els sistemes de CAD/CAM han demostrat que són eines capaces de construir tota mena de vehicles i de sistematitzar i simplificar la cadena de producció de vaixells, avions i cotxes i estalviar moltes hores de treball mecànic als operaris. Però això no es pot fer si no es disposa dels sistemes de disseny adequats que molts cops troben una vinculació més fàcil amb els models paramètrics que no pas amb els models estrictament geomètrics. En general, cal un cert grau d'estandardització formal per poder dur a terme un procés de construcció automàtica de les peces, controlar alguns aspectes geomètrics que no es poden construir i deixar els marges d'error necessaris perquè s'acoblin.

L'artefacte que més s'assembla en el seu procés de disseny i funcionament a l'edificació és el vaixell. En general, de la mateixa manera que les cases, acostumen a ser peces úniques que per les seves dimensions no es poden estandarditzar completament. A més, són elements que tenen grans espais buits en l'interior i que la major part del temps acullen activitats humanes d'una manera molt similar a com ho fa una casa, potser per això parlem d'arquitectura naval. Val a dir que la indústria naval s'ha automatitzat en gran mesura i que fa servir sistemes de CAD/CAM per fabricar vaixells, fins al punt de prescindir de gran part de la documentació gràfica. Per tant, si en el cas de la indústria naval l'automatització del procés de fabricació ha estat possible, per què no ho ha de ser en l'edificació? Hi ha moltes respostes a aquesta pregunta però no n'hi ha cap que ens porti a la conclusió que no sigui possible fer el mateix en el nostre àmbit. Certament la diferència més gran la trobaríem, per una banda, en els materials de fabricació, i, per l'altra, en el volum de demanda, que en el cas dels vaixells és molt inferior que en l'edificació i, per tant, són molt més cars.

² Kolarevic, B., *Architecture in the digital age · design and manufacturing* 2003, Taylor and Francis group, p. 8, "From ships to buildings".

1.1.2 Necessitats específiques de l'arquitecte respecte d'altres professions

Sovint l'enginyer es basa en els aspectes funcionals i en els elements prefabricats per generar un model, però aquesta aproximació no sempre és vàlida en el procés de disseny de l'arquitecte ja que els aspectes expressius i formals de vegades prenen un paper rellevant. Per altra banda, l'ús d'elements prefabricats no sempre s'adapta convenientment a les necessitats i particularitats de l'edificació. Per tant, la gran varietat de casos que es poden trobar en arquitectura fa que no sigui generalizable l'ús de sistemes paramètrics que, a més, compliquen els processos generatius³ quan necessitaríem una gran agilitat per modelar mentre, simultàniament, avaluem les característiques del resultat. Ajuntar aquestes dues propietats (la facilitat d'ús amb la capacitat d'avaluació tècnica) no és una tasca trivial pel que fa a la informàtica. De fet, representa un repte molt més complex que no pas l'ús de sistemes de comprovació paramètrics, ja que el procés d'introducció de dades té un paper fonamental en el disseny arquitectònic i ha de complir uns mínims de rapidesa, flexibilitat i/o simplicitat perquè pugui tenir lloc el que anomenem *arquitectura*, tant en l'aspecte expressiu com en el tècnic. És des d'aquesta perspectiva que plantejo aquest treball, buscant un sistema àgil i, al mateix temps, comprovable tècnicament, que permeti treballar amb criteris tècnics sense perjudici del disseny. Actualment hi ha un buit en aquest camp de l'arquitectura,⁴ fet que obliga molts arquitectes a buscar eines de representació polivalents i flexibles que després no es poden avaluar tècnicament, cosa que desvincula completament el disseny de la comprovació tècnica i obliga a fer servir múltiples models geomètrics d'un únic edifici per poder fer comprovacions tècniques. Per aquesta raó, una investigació detallada de les possibilitats de disseny que ofereixen les eines digitals (de cara a generar models indefinits que es puguin concretar gradualment, o de models paramètrics que es puguin replantejar amb molta facilitat) és essencial per mantenir el nivell de competència professional en un món que es dibuixa cada cop més digital. Des d'aquesta perspectiva, és clar que els arquitectes necessiten un sistema de modelatge progressiu en el qual el detall es concreti a poc a poc, i que permeti modificar el model de treball amb molta agilitat. Això és essencial en un procés de recerca formal que tingui lloc en un medi digital i, certament, el dinamisme o la capacitat de generar sistemes en moviment és molt més atractiu per solucionar aquests aspectes amb eficàcia que no pas la geometria estàtica convencional que fan servir actualment la major part dels programes dedicats al disseny. Només en l'àmbit de les animacions trobem la possibilitat de recrear moviments, però no són programes aptes per al disseny ja que

3 Woodbury, R., *Elements of parametric design*, 2010, Routledge, p. 24.

4 Mora, R., Bédard, C., Rivard, H., "A geometric modelling framework for conceptual structural design from early digital architectural models", April 2008, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 22, Issue 2, p. 254-270.

els falten eines bàsiques. Per això plantejo en aquesta tesi l'ús de sistemes dinàmics en temps real com a motor de generació formal en arquitectura, cosa que ja s'ha fet anteriorment^{5,6} i que actualment s'està desenvolupant. Si mirem la pàgina web d'Aedas,⁷ a la branca de CDR (*Computational Design and Research*), a la introducció podem llegir el següent: "We have developed a unique brand of participatory design combining interactivity, real-time processes, portability and scientific rigour".⁸ Com veiem, el fet de crear interacció en temps real és un valor que es té en compte a l'hora de desenvolupar noves tècniques i que, per tant, en aquesta tesi es té en compte des del primer moment.

1.1.3 Els sistemes físics de simulació com a possible resposta

De les diferents estratègies que es poden aplicar per generar models dinàmics, la reproducció de fenòmens naturals ha suscitat un cert debat com una alternativa a la geometria convencional. Conceptes com la capacitat per autoorganitzar-se, per veure's afectat per l'entorn o el polimorfisme s'han esgrimit com algunes de les capacitats dels sistemes naturals que es podrien aplicar a l'arquitectura.⁹ Tots aquests processos es poden materialitzar a partir de processos dinàmics basats en les lleis de la física que afectin la geometria del model tal com veure'm a la tesi. Per altra banda, aquesta aproximació permet establir una relació intuïtiva amb l'usuari ja que estem acostumats a preveure el comportament dels elements dinàmics segons les lleis físiques que experimentem cada dia i, per tant, ens hi sentim més còmodes. En aquest sentit, podem llegir d'un article recentment publicat que "[...] The ability of this approach to parallel real world characteristics reduces the early needs for abstract procedural and hierarchical development [...]".¹⁰ Per tant, si per una banda els sistemes dinàmics són una estratègia recurrent en les investigacions sobre processos generatius arquitectònics en el medi digital, el fet de basar-los en

5 Arvin, S. A., *Physically based mechanical metaphors in architectural space planning*, 2005, Texas A&M University.

6 <http://generativedesign.wordpress.com/2011/12/12/cracking-the-layout-problem/>

7 <http://aedasresearch.com>

8 "Hem desenvolupat un sistema únic de disseny participatiu que combina interactivitat, processos en temps real, facilitat d'ús i rigor científic [...]".

9 Hensel, M., Menges, A., Weinstock, M., *Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, 2006, Architectural Design, Volume 76, Issue 2.

10 "[...] la capacitat d'aquesta aproximació per assemblar-se a la realitat redueix les necessitats inicials de l'usuari sobre coneixements de processos i jerarquia [...]". Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmed, D., Tessier, A., Glueck, M., Khan, A., "Physics based generative design", 2009, Publisher:

Les presses de l'université de montréal, CAAD Futures 2009, p. 231-244 - 3. Physics based Process.

les lleis de la física els fa més intuïtius de cara a l'usuari i facilita el procés de disseny. A més, l'arquitectura ja té una certa tradició en l'ús de maquetes físiques dedicades a trobar formes segons les tensions, per tant, aquesta línia d'estudi es pot emmarcar dins d'una branca arquitectònica que ha donat resultats excel·lents. Per altra banda, la simulació de fenòmens físics ha estat un clàssic de la computació des dels primers sistemes de càlcul mecànics fins a les últimes tècniques emprades en jocs d'ordinador. Per això mostren un gran atractiu de cara a realitzar comprovacions prèvies dels dissenys que ens permetin estalviar la fabricació de models físics costosos i laboriosos. També permeten la simulació realista de situacions reals que permeten investigar fenòmens que no es poden reproduir en el laboratori o que no es poden preparar per a situacions de risc sense córrer cap perill. Com veiem, permeten una major eficàcia, disminució de costos i augment de la seguretat en molts camps.

La generació de formes a la natura segueix processos de desgast i optimització dels elements. En el nostre univers tot està sotmès a una implacable llei del canvi segons la qual no hi ha res que no s'acabi transformant en un nou estat. Però aquests processos tenen ritmes molt diferents i si bé n'hi ha de ràpids, que tenen lloc en segons, n'hi ha d'altres que tarden dies, anys, mil·lennis o, fins i tot, milers de milions d'anys. En general, tots els processos de canvi tendeixen a estabilitzar una situació que no era estable i, per tant, a equilibrar els factors que actuen en una peça fins que aquests s'equilibren, per contraposició de forces o per desaparició d'aquestes forces. En aquest sentit, els fenòmens físics optimitzen el cosmos i donen equilibri a les formes i harmonia a les relacions. Es tracta, doncs, d'un sistema natural d'optimització universal. Aquests mecanismes es poden simular mitjançant la programació de les fórmules físiques que els descriuen, de manera que en podem reproduir el comportament i ho podem aplicar als nostres dissenys, amb un control total i plena capacitat d'extracció de dades. Però, a més, aquesta metodologia ens permet modificar aquests processos de cara a alterar-ne el comportament natural i reproduir fenòmens de comportament anàleg al comportament natural, però dedicats a resoldre problemes geomètrics que ens puguin interessar. Aquest aspecte és essencial per fer servir adequadament aquests mecanismes, ja que la reproducció literal de fenòmens no és el que pretén aquesta tesi, sinó l'ús dels principis subjacents.

La simulació d'aquests fenòmens s'aplicarà per "trobar" més que no pas per "buscar", ja que tenen la propietat de poder transformar un problema en una solució i, per tant, poden resoldre conflictes. Normalment, l'arquitecte busca una solució a molts problemes a partir d'un procés de prova i error, i en aquesta fase el més important és ser capaç de sintetitzar els problemes en elements únics, que en solucionar-se responguin a tot un seguit de necessitats diferents. En aquest procés, la manera de resoldre el disseny acostuma a ser un fet subjectiu ja que la imaginació de l'arquitecte és el que donarà lloc a la proposta i no sempre es podrà plantejar clarament un procés racional darrere de la seva elecció. Aquest fet és la conseqüència de resoldre problemes que no són lineals sinó multiobjectiu, perquè acostumem a tenir més

“incògnites que equacions” i, per tant, moltes possibles solucions per a un únic sistema. “Buscar” és, doncs, un fet inevitable llevat que fem servir algun sistema de recerca diferent a la imaginació. En aquest sentit, s’han desenvolupat sistemes de solució matemàtica per a problemes que no tenen solució lineal, com ara els sistemes genètics o els sistemes iteratius. Aquests són capaços de donar resposta a diferents conflictes al mateix temps, d’una manera similar a com ho fa l’arquitecte però que òbviament no el poden substituir perquè no tenen la capacitat de discernir amb prou sentit comú per afrontar situacions inesperades o que no han estat prèviament programades. Primer de tot, són sistemes molt oberts que s’han de “controlar” per donar solucions vàlides i això requereix la intervenció d’un usuari que, amb cadascun dels seus actes, alterarà el resultat final i, per tant, deixarà inevitablement la seva empremta; en segon lloc, no resolen el problema d’escollir la millor solució ja que serà l’usuari qui haurà de fer aquesta tasca. Però sí que permetran racionalitzar el mecanisme de recerca formal de manera que les formes es poden argumentar, no és una elecció subjectiva.

Els processos que permeten transformar directament un problema geomètric en una solució formal acostumen a ser processos iteratius de prova i error, aquesta és la base per als sistemes genètics que a partir de la creació de poblacions de variacions sobre un tema n’escullen les millors i les reproduïxen de nou amb noves variacions. Aquest mecanisme fa servir la potència computacional directament aplicada per provar i provar fins que aparegui, per casualitat, el resultat. Però hi ha altres plantejaments de recerca que no es basen en la força bruta de computació per resoldre un problema, sinó en un principi més senzill basat a establir un procés de transformació a partir d’unes normes fixades que permetin accedir a les solucions de manera molt més directa. Les forces naturals que governen el nostre univers són un dels exemples més evidents de recerca formal iterativa que tenim al nostre abast. No es generen formes a l’atzar com en els sistemes de recerca genètics sinó que se segueixen lleis fixades per produir-les, lleis que, a més, les perfeccionen en un sentit o un altre. Aquesta és la metodologia que va fascinar Frei Otto o Gaudí, exponents molt significatius d’aquest plantejament de “trobar” més que “buscar”, que sense deixar de fer una arquitectura pròpia han fet servir sistemes de solució formal autònoms com a eina fonamental del seu treball. Val a dir que la imaginació no deixa de tenir un paper significatiu en la recerca formal basada en la simulació física, ja que la intervenció de l’objecte es trasllada al procés de transformació d’aquest objecte. D’aquesta manera, controlem processos més que no pas formes tal com ja passa amb el disseny paramètric, en el qual l’edició de les relacions entre els elements és més important que l’edició directa del model.¹¹ Inevitablement, aquests mecanismes han permès obtenir formes pròximes a la natura ja que els processos que es fan servir acostumen a ser processos que també actuen en el món natural, que són capaços de resoldre amb senzillesa els problemes més complexos. Però ara tenim la

¹¹ Woodbury, R., *Elements of parametric design*, 2010, Routledge, p. 24.

capacitat no només de fer servir aquests processos amb molta més facilitat i control, sinó d'alterar-los i de jugar amb els mecanismes subjacents que fan servir per dedicar-los al propi disseny.

En el món de l'arquitectura ja s'havien fet servir sistemes d'optimització formal basats en el teorema de la catenària inversa, que permetien obtenir arcs i voltes òptims a partir d'un procés natural de deformació. Eren sistemes que molts cops requerien de la fabricació de models físics amb els quals poder "calcular" mecànicament la solució, un cop obtinguts els resultats s'haurien d'extreure les dades del model i aplicar-les a l'escala corresponent. Ara podem generar aquests models amb sistemes digitals i reproduir-hi tota mena de forces tants cops com faci falta fins a obtenir el resultat adequat. El control dels processos és més gran, els resultats es poden obtenir a l'escala que correspon i els objectes poden ser molt més complexos. Però el pas al món digital no és fàcil ja que encara hem de desenvolupar les eines adequades de treball i definir com serà el model que volem fer servir.

1.2 Objectius de la tesi

Si bé els sistemes digitals de simulació física han demostrat un gran potencial per simular les lleis de Newton, encara no han fet cap aportació significativa al món del disseny a l'arquitectura més enllà de casos puntuals. Segurament la manca de recerca per part dels arquitectes en l'àmbit del programari digital, activitat que han delegat excessivament en els enginyers, ha fet que manqui molta investigació sobre les possibilitats que tenen aquests sistemes a l'hora de millorar l'activitat professional de l'arquitecte. Per això, ens trobem en una situació on no disposem d'eines adequades per una de les tasques més importants de l'ofici, que és el procés de disseny¹² i, a més, hi ha mancances importants en el procés de definició tècnica de l'edifici on l'ús de les tècniques digitals es pot millorar. Això limita el potencial de l'arquitecte per proposar geometries complexes en no ser capaç d'aprofitar la capacitat de computació per complementar la seva capacitat de disseny; a més, es perd la possibilitat de fer una feina molt més eficient. Cal, doncs, investigar la capacitat d'aquests mecanismes per fer aportacions al món de l'arquitectura, ja que l'augment de capacitat de computació no reverteix en avantatges equivalents per als arquitectes, cosa que els deixa en un clar desavantatge davant d'altres oficis que han pogut integrar millor aquests sistemes en la seva tasca professional. Un exemple el trobem en els estats d'amidaments, que en molts casos encara es fan a mà. Una cosa similar podem dir del compliment tècnic dels projectes que difícilment s'arriba a assolir completament. En el millor dels casos, ens veiem obligats a crear diferents models d'un mateix edifici amb diversos programes

¹² Terzidis, K., *Algorithmic Architecture*, 2006, Elsevier, p. 39.

per poder fer totes les comprovacions pertinents, amb els problemes de coherència que això comporta i, malgrat tot, encara hi ha molts aspectes que cal repassar a mà. Però resulta que l'ordinador és capaç de fer tots aquests càlculs milers de vegades per segon sense equivocar-se, fet que sembla que no inquieta suficientment els professionals. El cas és que aquest potencial no s'aprofita perquè no hi ha un programari que ho permeti. És essencial, doncs, aconseguir una eina que integri aquests aspectes des del primer moment per tal d'agilitar tot el procés de disseny. Però per fer-ho de la millor manera possible cal anar més enllà de la simple inclusió d'aquests aspectes en un únic programari que, de manera natural, l'únic que faria seria crear un programa desmesuradament complex. Si volem que aquests aspectes no impedeixin una expressió plena de l'arquitecte cal integrar-los dins la metodologia de treball en un únic model. No oblidem que aquestes comprovacions tècniques en realitat són el reflex de les necessitats de les nostres edificacions un cop construïdes i, per tant, hi haurem d'estar en harmonia a la força.

Fer servir sistemes dinàmics va en aquesta direcció, ja que els estats de tensions que normalment responen a l'estructura es tornen eines de disseny amb les quals podem plantejar tota mena de condicions geomètriques i tensionals, i integrar aquests aspectes de manera definitiva en el disseny de l'edifici. Si volem fer alguna cosa que escapi a aquestes condicions en serem plenament conscients i podrem comprovar-ho en tot moment, ja que transgredir aquestes normes amb coneixement no és el mateix que transgredir-les per accident. Per tant, s'integra un aspecte tècnic com a eina de treball que permet combinar la geometria i l'estructura. El fet, però, de treballar amb aquesta estratègia també planteja canvis conceptuals i tècnics que difereixen d'aquells que es plantejaven amb les eines de CAD tradicionals i que posa l'accent en aspectes diferents als quals feia el dibuix lineal. Conceptes com el de moviment, massa, força, equilibri i agrupació prenen el relleu a velles tècniques de dibuix geomètric on es feien servir estratègies elaborades de dibuix per obtenir la posició i característiques de cada element. No desapareix la geometria, però s'assoleix de manera diferent i això permet explorar mecanismes de treball que aborden qüestions que amb un sistema tradicional de dibuix no es poden ni plantejar. La solució geomètrica dels elements permetrà controlar dissenys de gran complexitat formal amb poc esforç, sempre que estiguin correctament plantejats, i modificar-los en temps real mentre l'usuari observa com es van transformant. Aquest procés de transformació iteratiu, visual, en el qual es pot intervenir, és fonamental per comprendre com serà la possible arquitectura a què doni lloc aquest sistema.

1.2.1 El control geomètric a través d'elements dinàmics

1.2.1.1 *Estudi de la relació amb l'usuari*

Fer servir sistemes de simulació física com a eina de modelatge ens obliga a controlar la forma de l'objecte a partir de camps de força, que en alguns casos resulta molt difícil. Tot i que els comportaments basats en simulacions físiques resulten molt intuïtius,^{13,14} no estem acostumats a fer-los servir de forma activa, sinó més aviat de forma passiva. Per obtenir un resultat precís ho tenim, doncs, una mica difícil, en canvi, obtenir un model aproximat és molt més senzill perquè podem preveure de manera aproximada com afectarà una força a un conjunt. En treballar amb elements dinàmics també correm el risc de perdre el control dels elements. L'inconvenient de la manca de control sobre el resultat, si bé es pot preveure, no sempre es pot controlar amb prou precisió. Per exemple ja a finals de la dècada de 1980 es va parlar d'aquesta temàtica, en un article de Demetri Terzopoulos es recull un comentari d'Alan Barr que, en aquest sentit, exposa el següent:

"It lets you control the physics and get what you want in a mathematically guarantee way. Whatever you don't say that you want, you're not guarantee to get. There might be a happy accident in which the physics might accidentally give you what you want, but it won't be guaranteed, unless you use a mathematically guaranteed method".¹⁵

Si alguna cosa no s'ha programat específicament per actuar d'una manera concreta, el sistema pot presentar una manca de control important sobre el resultat i els sistemes de simulació física genèrics, que són els que volem fer servir per al sistema de CAD, no estan específicament dissenyats per a una tasca concreta, per tant, semblaria que no poden donar resultats concrets. Però això es pot solucionar a partir de la generació d'eines que ens permetin controlar

13 Kagan, P., Fischer, A., Shpitalni M., "Intuitive physically based CAD system for designning os sculptured surfaces", 1996, *CIRP Annals - Manufacturing technology* volume 45, Issue 1, p. 121-124. **introduction.**

14 Terzopoulos, D., Qin, H., "Dynamic NURBS with geometric constraints for interactive sculpting", 1994, *ACM Transactions on Graphics* Volume: 13, Issue: 2, Publisher: IK, DTU, p. 103-136.

15 "[...] et permet controlar la física i obtenir el que tu vols de manera matemàtica. Tot allò que no ha estat especificat no tens cap garantia d'obtenir-ho. Potser, de forma accidental, la simulació física farà el que tu volies, però no en tens cap garantia, tret que ho hakis especificat matemàticament". Terzopoulos, D., "Physically based modeling: past, present and future", 1989, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Volume: 23, Issue: 5, Publisher: ACM Press, p. 191-209, **p. 201.**

ràpidament aquestes simulacions, d'una manera prou senzilla perquè el sistema el pugui utilitzar per qualsevol usuari i suficientment precisa perquè el resultat ens pugui ser útil. Per altra banda, també és necessari comprovar el grau de precisió que podem obtenir amb aquest sistema i si ens servirà per fer un model que sigui prou precís. Així doncs, la tesi es proposa, en primer lloc, explorar aquesta possibilitat i establir les pautes necessàries per al control eficaç de les funcions dinàmiques.

1.2.1.2 *Capacitat per controlar elements complexos*

Gràcies a la capacitat del sistema per establir relacions dinàmiques entre elements en podem coordinar la modificació de manera que amb una sola acció aconseguim una modificació general del model. Un exemple molt clar el trobem en el cas de les malles definides per vèrtex, que com que és un element d'una certa complexitat geomètrica amb sistemes de modelatge convencionals ofereix una capacitat de control molt pobre. En aquest cas, ens caldria moure els vèrtexs de la malla un a un per aconseguir una modificació general, ja sigui un estirament, una deformació o un relleu diferent. En canvi, amb sistemes dinàmics podem millorar el control de la malla de manera que si només modifiquem els nodes de control la resta d'elements es modifiquen seguint els camps de força interns. D'aquesta manera, un canvi concret produeix la modificació de tot el model sense haver de passar per totes les parts.

La base del funcionament d'aquesta idea és aprofitar la capacitat dels camps de força per actuar sobre tots els elements a partir de regles senzilles i previsibles. Com que podem preveure més o menys quin serà el resultat de la seva acció quan modifiquem el model, podem utilitzar aquestes regles a favor nostre perquè ens ajudin en el modelatge. Lògicament, de moment només poden produir modificacions molt bàsiques, que no per això deixen de ser extremament útils, però és possible que en el futur es desenvolupin sistemes per modificar automàticament el model d'una manera molt més concreta i funcional, i així millori extraordinàriament la capacitat de control de l'usuari. Si tornem al procés esmentat, en modificar algun dels nodes de control aquest estirarà els elements als quals vagi connectat i, al seu torn, afectaran els següents, i així fins a produir un canvi global en el model sense necessitat d'intervenir-hi. Com que molts cops els canvis que necessitem produir són molt trivials aquest mecanisme es mostra molt útil. Per altra banda, els diferents camps de força que actuen sobre cada subelement també s'adaptaran a les noves condicions i produiran els canvis pertinents en la seva zona d'acció que, de manera molt més discreta, acabaran produint canvis globals. Per tant, el conjunt mantindrà la coherència geomètrica.

Aquesta propietat aparent dels sistemes dinàmics cal posar-la a prova per comprovar com, i en quins casos, el sistema permet controlar elements complexos, quina mena d'elements permet

modificar amb més facilitat i quines eines calen per fer-ho. Cal, doncs, experimentar amb una certa agilitat modificant models de diferents tipus per poder comprovar que, efectivament, és possible controlar grans quantitats d'elements. Per altra banda, si els elements complexos es poden controlar fàcilment, caldria establir quines conseqüències té aquesta capacitat sobre el procés de modelatge de manera que puguin sorgir noves tècniques.

1.2.2 Processos d'optimització

1.2.2.1 *Optimització de superfícies de panells*

Aquesta metodologia basada en el dinamisme de les peces també ofereix la possibilitat d'optimitzar la disposició dels elements d'un conjunt a partir de la modificació de les regles que en controlen el comportament global i oferir, així, la capacitat d'establir condicions geomètriques sobre el model que es compleixin automàticament sense la intervenció de l'usuari. Val a dir que ara tot just es comença a plantejar aquest recurs com una manera sistemàtica de solucionar problemes en el camp del disseny. Ho intentarem aplicar sobre el cas concret dels panells que, com veurem, aplicar-ho dóna lloc a solucions molt suggestives i variades. El cas dels panells ens permet deduir que en qualsevol àmbit en el qual s'apliqui aquest sistema pot ser una eina útil per investigar les possibles solucions als problemes plantejats d'una manera diferent a com ho hem fet fins ara i amb resultats que poden ser perfectament vàlids.

A diferència dels mètodes de resolució directes en els quals una fórmula matemàtica o un seguit de funcions donen un resultat exacte, en el cas dels sistemes dinàmics, quan es dóna un canvi en l'equilibri de tensions (per una modificació de la geometria o per un canvi dels paràmetres que controlen la força), el sistema comença a buscar iterativament un nou equilibri que normalment passa perquè la geometria es modifiqui de manera substancial. Com que el sistema no busca una solució directa i, per tant, encara que li proposem un problema impossible no busca un resultat exacte, sempre serà capaç d'aproximar la millor solució. La clau està en el procés que segueix per solucionar el problema, que intenta resoldre a poc a poc i no d'un sol cop. És capaç d'anar endavant i endarrere, d'oferir resultats completament inesperats i de funcionar en condicions adverses, sempre millorant i aproximant més i més el resultat. La tesi pretén, doncs, experimentar amb aquest potencial dels sistemes digitals per donar resultats inesperats¹⁶ i aplicar-lo a casos concrets que ens poden ser útils en el món de l'arquitectura.

¹⁶ Terzidis, K., *Algorithmic Architecture*, 2006, Elsevier, p. 21.

1.2.2.2 *Inclusió de la lògica constructiva*

Gràcies a la capacitat que el sistema té per regular la manera com es modifica el model, apareix un nou concepte de gran interès en el món de l'arquitectura, l'*Embedding Fabrication Logic*,¹⁷ que fa que la manera com el model es modifica es correspongui amb les restriccions constructives de la futura edificació. El nom d'*Embedding Fabrication Logic* es podria traduir per lògica constructiva integrada; segons aquest principi, s'aprofita la capacitat del model per modificar-se de manera intel·ligent segons una sèrie de regles imposades per l'usuari. Aquesta "forma intel·ligent" pot canviar la manera com es percep el model arquitectònic perquè en dissenyar un model amb sistemes dinàmics involuntàriament estem creant un mecanisme generador, i és a través d'aquest mecanisme que l'arquitecte mostrarà les seves habilitats. Així, doncs, el disseny no es manifesta exclusivament en la forma final del model, sinó en la lògica del comportament d'aquest quan es transforma. Per tant, és molt important el concepte de "forma intel·ligent" perquè serà on l'arquitecte podrà expressar la seva singularitat.

Generar un comportament implica preveure com volem que es modifiqui el model quan nosaltres hi exercim una acció. Controlar aquest procés pot ser essencial no només de cara a la creativitat formal sinó també en la integració de lògiques constructives en el resultat final. Així, l'usuari no ha de pensar més si el seu model és geomètricament viable o no, pot experimentar lliurement amb la forma i centrar els esforços en altres aspectes que consideri més importants mentre el propi sistema resol els conflictes constructius més importants de manera automàtica. Però també cal tenir present que això implica que algunes accions de l'usuari quedaran limitades o corregides a causa d'aquest procés d'autocorrecció, que segurament restringirà el camp d'exploració i, per tant, no serà possible fer qualsevol forma. Aquesta propietat permet que els dissenys adquireixin molta més complexitat sense que quedin fora de control ni necessitin una dedicació excessiva, que fa que nous tipus de plantejaments, que amb models estàtics no es podrien ni proposar, els pugui treballar eficientment una sola persona. És, doncs, essencial que es pugui dissenyar aquest comportament de manera relativament eficient i que, al mateix temps, sigui fàcil d'entendre com funciona. En això entren en joc aspectes que no tenen únicament a veure amb el model físic de simulació, sinó que també tenen a veure amb la interfície del programa; més endavant veurem com s'ha tractat aquest tema.

Recordem que els sistemes de simulació física, en treballar de manera discreta, poden aproximar solucions a problemes que no es poden resoldre de cap altra manera i ho poden fer en relativament poc temps. Cal, però, ser capaç de formular, en forma de forces, un problema

¹⁷ Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmed, D., Tessier, A., Glueck, M., Khan, A., "Physics based generative design", 2009, Publisher: *Les presses de l'université de montréal*, CAAD Futures 2009, p. 231-244.

perquè el pugui resoldre el sistema; llavors la solució sorgirà de manera espontània. No tots els problemes es poden plantejar d'aquesta manera. N'hi ha que requereixen de la generació o eliminació de dades i, en aquest cas, les simulacions físiques no poden generar o destruir l'objecte sobre el qual actuen. Però per a la resta de casos seria interessant experimentar amb la capacitat que puguin tenir per resoldre problemes aplicats a casos constructius reals.

1.2.3 Estudi dels models dinàmics

1.2.3.1 *Potencial de disseny*

Estudiar quins són els models que s'adeqüen millor als sistemes dinàmics és essencial de cara a preveure'n la possible aplicació. Ja podem intuir que les formes funiculars i tènssils seran molt adequades, però cal preguntar-se si hi ha altres geometries que també es poden tractar amb sistemes dinàmics, aspectes que fins ara no s'havien plantejat i que es poden incorporar al repertori formal dels arquitectes amb la introducció d'aquests mecanismes. Tenint en compte l'elevada capacitat d'aquests sistemes per combinar condicions geomètriques i donar una resposta vàlida, es pot intentar integrar casos molt més complexos que la simple volta funicular i veure quina mena de resposta dona. Aquests resultats es poden comparar amb les solucions que tradicionalment s'ha donat a alguns d'aquests problemes i veure com el sistema dinàmic ha plantejat la solució.

En casos contemporanis pels quals no hi ha solució tradicional, el sistema ens pot donar pistes sobre quina estratègia formal pot ser la més adequada per solucionar un problema geomètric determinat i optimitzar, d'aquesta manera, el disseny en els estadis més primerencs. No oblidem que aquest model inicial ja està digitalitzat i, per tant, el pas de l'esbós al detall tècnic no suposa un salt tan brusc com quan fem servir esbossos fets a mà. Això no només implica més capacitat de disseny, sinó que, a més, els esbossos es poden integrar com a part del procés digital, i així deixa de ser un procés a part que cal fer a mà i que després cal digitalitzar amb tècniques que acaben distorsionant la idea original. Si això es pogués fer en el tractament digital del disseny podríem planificar els nostres projectes des del primer moment amb tots els avantatges de compatibilitat i tractament que ofereixen els sistemes digitals.

A tots aquests avantatges se suma un altre factor important, l'estil arquitectònic que imposen aquestes tècniques basades en sistemes dinàmics, ja que no podem oblidar que l'eina amb la qual modelem imposa uns condicionants a la forma que afecten directament el resultat i per això cal conèixer quina serà la tendència natural a l'hora de modelar amb aquest sistema. Com

veurem, les formes seguiran, en gran mesura, les estructures naturals, però això també es pot aplicar de maneres molt més variades a com s'ha fet servir fins ara. La solució no sempre es podrà relacionar amb una forma natural ja que es poden aplicar forces pseudofísiques que són similars però no iguals a les forces naturals i que, per tant, plantejaran solucions que ens poden resultar estranyes. En conjunt, podem guanyar un punt de vista nou sobre com es poden afrontar els problemes de disseny, que es podria considerar un estil tant en l'àmbit funcional, com en l'estructural i l'estètic.

Per tant, fer un estudi sobre les propietats que pot tenir l'ús d'aquesta metodologia de treball en l'àmbit artístic, o en el procés de treball, és important de cara a tenir una visió completa de les possibles aplicacions d'aquest sistema. A partir del CAD basat en sistemes dinàmics podem realitzar aquestes experiències amb les quals podem comprovar els efectes reals del sistema sobre el model, el procés de treball i la varietat formal de la qual disposa l'arquitecte.

1.3 Metodologia general d'estudi de la tesi

Des de fa uns quants anys, la programació m'ha permès investigar diferents tipus de fenòmens a partir de la simulació amb l'ordinador. En aquesta tesi intento aprofitar aquesta capacitat com a mètode d'investigació per aprofundir en el coneixement dels sistemes dinàmics com a eina de treball en arquitectura, per tant, faig servir la programació de forma sistemàtica en aquesta tesi. En iniciar la investigació apareixen moltes maneres de plantejar l'estudi a partir de la programació i cal que n'esculli una que sigui coherent amb les expectatives que ens plantejem.

1.3.1 Procés d'investigació

La metodologia general es basaria a fer servir algun tipus d'aplicació per introduir els conceptes que volem comprovar de manera que es puguin aplicar a algun cas concret. Fer-ho ens permet passar de la teoria a la pràctica amb certa agilitat, de manera que ràpidament pugui establir quines idees són vàlides i quines no són pràctiques. Així, doncs, de cara a fer l'estudi dels sistemes dinàmics programaré una aplicació CAD senzilla en la qual introduiré un sistema de dibuix geomètric complementat per funcions dinàmiques. En aquest programa prototip es podran comprovar les idees teòriques que s'exposen a la tesi de manera que se'n pugui fer un ús pràctic amb el qual poder corroborar les expectatives que teníem sobre aquest ús. Com a resultat d'anar provant diferents idees, aspectes i funcions, el programa anirà guanyant complexitat i es completarà amb l'avenç de la investigació. Cal afegir que de les proves sortiran models que es podran exportar a altres programes i que serviran d'exemple i demostració del treball realitzat.

Un altre aspecte que sorgeix en anar introduint diferents funcions a l'aplicació és que cal desenvolupar paral·lelament una estratègia de treball general. Aquest aspecte només es pot tractar quan tot es fa sobre un mateix programa i vincula totes les funcions entre si de manera que s'entengui que, més enllà del que serien els diferents casos particulars de simulació física, hi ha una lògica de conjunt que les uneix, que no és únicament un tema teòric sinó també funcional. A partir d'una sèrie d'exigències de versatilitat i percepció per part de l'usuari, cal tenir en compte una certa uniformitat en el plantejament del control de les funcions. Aquest aspecte és complex i implica la coordinació de molts factors de natura diferent, que no es poden tractar si es treballa amb diferents aplicacions aïllades ni tampoc des d'un punt de vista teòric; a més, és un aspecte fonamental que cal resoldre si volem fer una aplicació realment funcional més endavant. En el moment de comprovar un plantejament cal programar la base de dades, les forces i altres elements que involucrarà l'estudi de l'element. Això s'ha de fer mantenint la compatibilitat amb els mecanismes d'edició del programa i la resta d'elements prèviament treballats, cosa que obliga a buscar principis generals més que no pas solucions puntuals. Com a resultat obtenim una sèrie d'objectes i funcions genèrics amb els quals es resolen la major part de casos, de manera que cada nova comprovació amplia o poleix algun dels aspectes previs del programa. Un cop fet, es comprovarà el funcionament del sistema per veure que sigui correcte. Es pot donar el cas que la idea inicial necessiti una revisió total per tal de funcionar de la manera prevista, o que sigui molt o completament impossible de programar; llavors cal tornar al plantejament teòric i tornar-lo a formular. Si la comprovació ha estat possible s'estudiaran els resultats per detectar els possibles problemes, virtuts i necessitats que ha comportat, i per acumulació s'aniran afegint més i més elements al programa d'aplicació dinàmica de manera que la investigació anirà ampliant i completant el programa prototip. De l'estudi dels resultats podrem deduir els principis generals que poden afavorir o impedir l'ús dels sistemes dinàmics de disseny gràcies al fet que tot ho fem sobre un programa de modelatge. Aquest sistema també ens permet establir el comportament dels mecanismes dinàmics sobre casos concrets d'estudi, de manera que ja des del primer moment pugui tenir una aplicació funcional i pugui enfrontar-se a problemes reals dels quals es podran aprendre lliçons valuoses. En conjunt, és un sistema d'estudi en el qual la investigació i l'aplicació es basen mútuament en el desenvolupament de l'eina dinàmica de treball i que permet aprofitar la tesi des de diferents vessants.

1.3.2 Anàlisi dels resultats

Els resultats generats es poden exportar a un programa de CAD en el qual estudiarem el model en detall, veurem quines propietats geomètriques té i quin grau de precisió hem obtingut. D'aquesta manera, podem avaluar la capacitat del sistema dinàmic per generar models que ens

puguin ser útils per a la definició geomètrica de l'edifici. Per altra banda, també estudiarem quin és el ventall de morfologies que s'han obtingut amb aquest mètode i les classificarem de manera que puguem establir quins són els casos habituals que es poden treballar amb sistemes dinàmics de manera eficient. Per classificar els models farem servir un criteri basat en la tipologia arquitectònica que permet reproduir la temàtica constructiva, estructural o generativa que resolten ja siguin malles, arcs, elements volumètrics, pannel·lització, etc. Aquesta classificació permet començar a establir quines àrees del modelatge són més propenses a millorar amb l'ús de sistemes dinàmics i quines tipologies arquitectòniques responen millor al tractament amb aquests mecanismes. També serà necessari comprovar la dificultat que hem tingut per poder manipular els models fins a obtenir-ne el resultat desitjat i avaluar, així, el procés de treball i si és possible millorar-lo intentant afegir funcions que resolguin els problemes habituals que sorgeixen en l'ús d'aquests mecanismes. Finalment, ens cal analitzar els processos inesperats que tenen lloc en treballar amb models dinàmics i que poden ser molt interessants i intentar entendre per què tenen lloc i què aporten al conjunt de l'estudi.

D'aquest estudi de casos particulars en sorgiran uns casos d'aplicació principals sobre els quals els sistemes dinàmics mostren moltes possibilitats de tenir aplicació directa. També hi haurà uns casos d'aplicació secundaris en els quals, amb menys adaptacions, aquests sistemes mostren un gran potencial per optimitzar processos habituals en el camp del modelatge. Finalment, sorgiran unes conclusions de caire general sobre el funcionament dels sistemes dinàmics que donaran una idea àmplia sobre les implicacions que en comporta l'ús. Aquestes conclusions, a més, obriran noves vies d'investigació de cara al futur amb les quals es podrà ampliar el present estudi i aprofundir en els diferents aspectes que hagin sortit de la tesi.

1.3.3 Del que és general al que és específic?

En seguir aquesta metodologia el nostre punt de vista sobre els sistemes dinàmics es va transformant a mesura que s'introdueixen nous casos, de manera que millora el coneixement sobre les potencialitats del sistema. A mesura que es fan més proves, i es van ajustant les funcions, augmenta la capacitat de comprovar casos particulars gràcies a la inclusió d'eines i estratègies noves. Però com que partim d'un plantejament general en el qual s'intenta resoldre la major part dels casos amb el mínim de funcions, els models esquemàtics són fàcils de fer, però el tractament específic no sempre és possible perquè és molt difícil arribar al detall que el projecte requereix en la fase de projecte executiu (sense posar "pedaços" que alterin la lògica general del programa). Així doncs, encara que aquesta capacitat per anar del general a l'específic és fonamental en qualsevol sistema de CAD i, per tant, és imprescindible que els

sistemes dinàmics puguin preveure aquest aspecte, el procés progressiu de definició al qual hem pogut arribar només ens serveix per a les fases inicials. Això es deu al fet que quan treballem amb models tridimensionals en un sistema dinàmic, a la dificultat de modelar se li suma la de plantejar correctament els camps de força i això implica generar un mecanisme. Encara que aquest sistema sigui molt útil per al control general dels elements, quan hem de fer detalls ens trobem que cada nova forma és un nou mecanisme i en aquestes condicions és molt difícil de treballar de manera eficient. Per tant, de moment els sistemes dinàmics tenen una capacitat de detall limitada. Cal tenir en compte, però, que els sistemes dinàmics sí que poden arribar al nivell de detall necessari per fer comprovacions ambientals i estructurals i, de fet, són models molt més compatibles amb aquestes comprovacions que no pas els models geomètrics en CAD convencional. També és important el fet que permeten generar models globals que més endavant es poden exportar i fer servir per fer un model més detallat de la mateixa manera que els models estructurals mai no són completament detallats perquè no és necessari per al càlcul. Potser els sistemes digitals necessiten un procés de generació del projecte diferent al que hem seguit fins ara en el qual, com es feia antigament quan es construïen les façanes dels edificis en brut i més endavant es polien i completaven, caldria ara un procés equivalent en el camp digital, que primer s'ocupés de fer models generals de tipus esquemàtic sobre els quals es poden operar i comprovar els aspectes tècnics bàsics del projecte i, un cop n'hem validat el funcionament, es pot detallar el model d'una manera més exhaustiva. Seguint aquest procés el model inicial es pot generar sense dificultats amb sistemes dinàmics i després es pot fer servir algun altre programa per detallar-lo.

1.4 Programa de simulació dinàmica

A l'hora d'investigar la funcionalitat d'una metodologia de treball digital ens podem enfrontar a diverses estratègies de treball amb les quals es pot comprovar la viabilitat del sistema en diferents graus. Depenent dels coneixements d'informàtica que tingui l'investigador pot accedir a més o menys possibilitats d'exploració en l'àmbit digital. En general, però, tenim tres possibilitats molt clares a partir de les quals acarar la investigació:

- La primera és buscar programes que ja facin coses iguals o similars a les proposades i assumir les limitacions que aquests tenen a l'hora d'exposar els avantatges i desavantatges del sistema. L'estudi es limitarà a experimentar amb les eines que altres persones hagin programat i, per tant, comprovar idees noves serà, en molts casos, difícil o impossible.

- Una segona opció és fer servir un sistema de programació simplificat i que actuï sobre algun altre programa que li faci de base de treball. Aquest mecanisme permet aprofitar la interfície, els sistemes de representació, i totes les eines de què ja disposa el programa de base sobre el qual es treballa per aplicar-les a les idees que un proposa. Això semblaria un gran avantatge, però en realitat no només heretarem els avantatges del programa inicial, sinó que també heretarem, encara que no ho vulguem, els desavantatges que pugui tenir en el seu plantejament, les seves estratègies i el seu àmbit d'aplicació. Per tant, també limitarem el que podem demostrar a aquells casos que es puguin fer sobre l'aplicació de base que fem servir. Tot i això, aquesta estratègia és molt millor que la primera ja que hi haurà moltes coses noves que podrem proposar, però dins d'un àmbit limitat.
- La tercera via és començar de zero. Si a un escriptor li fa por la pàgina en blanc, no cal dir quin ha de ser el sentiment d'un programador en trobar-se en la mateixa situació. La pregunta que en general tothom es planteja és "per on començo?". Resoldre-la no és tant important com la pregunta en sí, que és essencial perquè fa et qüestionar tot el que normalment donem per suposat quan treballem amb una aplicació. L'autor ha de preveure, programar i dissenyar detalls com el canvi de color quan el ratolí passa per sobre d'un botó fins a la manera com guardaràs les dades per poder-les modificar més endavant. Això dóna una gran llibertat i també una gran responsabilitat, i en la mesura que la por inicial queda enrere a poc a poc creix la capacitat per comprendre el que realment rem fins a l'última conseqüència. Entenem que aquesta és la millor manera d'investigar realment sobre una plataforma digital ja que un es deixa de veure limitat pels plantejaments que altres programes han pogut fer sobre el tema i comença a desenvolupar-se una manera de fer les coses que és fruit d'inquirir sistemàticament en tots els aspectes de la investigació. Una altra raó per la qual es programa des de zero és perquè volem tenir una idea global del funcionament d'aquest mecanisme en un entorn digital. Imaginem que decidim provar un sistema de simulació molt eficaç, que permet resoldre tota mena de casos sense dificultats però que no permet desar dades en un arxiu per alguna peculiaritat. En aquest cas, tot i que és molt funcional no és una opció útil perquè falla en un aspecte essencial. Precisament els sistemes dinàmics han tingut un problema similar perquè no és possible la modificació controlada del model sense programar el sistema i, per tant, cal abordar la investigació com un tot sencer per demostrar que l'estudi pot tenir alguna validesa funcional. Cal entendre que moltes de les capacitats dels sistemes digitals no es fan servir perquè no es poden plantejar de manera controlable o rendible, i les bases de dades que requereixen fallen en algun aspecte essencial. En concret, un dels problemes més grans dels sistemes dinàmics és la dificultat que tenen per treballar de manera precisa.

És en aquest context que intento desenvolupar un programari de demostració que m'encari de manera esquemàtica amb aspectes clau de l'ús de sistemes de modelatge dinàmic per comprovar com ha de ser una aplicació digital basada en aquest principi. No puc passar per alt elements que semblarien relativament trivials com la manera amb la qual s'accedeix a les propietats dels objectes, la manera com es fan servir els botons, les funcions de què es disposa en el moment de modelar, etc. Tot això s'ajusta al que seria treballar amb sistemes dinàmics en la mateixa mesura que la base teòrica que fem servir o les bases de dades de les quals ens valguem per representar el model. Per això, no poden quedar fora de l'estudi, encara que sigui en un segon terme, tots aquests aspectes ja que seran el que realment facilitarà o dificultarà l'ús d'aquesta eina. En aquest sentit, volem recalcar que un dels avenços més importants dels últims temps en modelatge digital té a veure amb el mètode de control en forma d'esquema que planteja Grasshopper¹⁸ de Rhino. Tot i que la idea no és nova, el fet de plantejar-la en el programa i el moment adequats han estat la clau de l'èxit. Això ens crida l'atenció per no descuidar aquests aspectes que tenen un paper molt més important del que sembla.

Un altre aspecte fonamental de programar directament és que et trobes amb els problemes reals que el teu plantejament implica en tota la seva complexitat tècnica i, per tant, els pots resoldre. Molts cops els plantejaments teòrics sobre sistemes digitals no tenen en compte aspectes funcionals i tècnics que són essencials per al futur de l'aplicació i que no tenir-los transforma l'estudi en una especulació sense fonament. Problemes que van des de la tasca trivial de seleccionar un element que, en ser dinàmic, costa de caçar amb el ratolí, fins al fet de treballar amb una base de dades que contínuament relaciona diferents elements i que en eliminar-ne un planteja gravíssims problemes de numeració perquè les llistes deixen de tenir correspondència entre elles. Totes aquestes qüestions s'han de tenir en compte i s'han d'exposar si es vol un estudi rigorós. Tot això apareix quan treballem a fons amb un programa; quan treballem en aquest àmbit és quan ens trobem amb la realitat del que el nostre plantejament proposa, amb problemes reals i concrets que no són fàcils de comprendre amb especulacions teòriques, tant pel funcionament com per la importància, i per als quals cal donar una solució al més senzilla possible. Si fem les coses així entendrem per què els programes treballen com treballen, per què hi ha coses que no es poden fer encara que semblin molt senzilles i per què coses molt difícils són, en realitat, grans trivialitats a l'hora de programar.

El programa amb què farem les comprovacions, i que es desenvoluparà a la tesi, ha de ser una eina de modelatge en CAD capaç de reproduir fenòmens dinàmics a partir de simulacions

¹⁸ <http://www.Grasshopper3d.com/>

físiques. Amb aquest mecanisme comprovaré la capacitat del sistema per resoldre problemes geomètrics complexos sotmesos a múltiples constriccions formals que, ara com ara, no hi ha cap sistema de càlcul directe que pugui resoldre. També experimentaré amb la possibilitat d'aplicar aquests mecanismes en diversos casos com, per exemple, comprovar la capacitat del sistema per resoldre problemes estructurals o constructius, veure quina capacitat té per fer d'enllaç entre els aspectes artístics i els aspectes tècnics del projecte (que permeti una comprovació aproximada en temps real del model) i molts altres aspectes que apareixeran sobre la marxa. Per poder abordar aquest tema ens cal integrar els sistemes de CAD i els sistemes dinàmics en una única eina capaç de donar resposta als problemes més bàsics o, com a mínim, demostrar el potencial per fer-ho. També serà necessari proposar una metodologia de treball nova, que permeti afrontar el control de les interaccions dinàmiques entre diferents elements.

1.4.1 Idees prèvies

1.4.1.1 La geometria des del punt de vista digital

Des del punt de vista del programador, el concepte de geometria és diferent del que es pugui tenir quan dibuixem sobre el paper perquè ja no es treballa amb la forma com a concepte sinó amb l'algorisme, la base de dades i el sistema de representació. Això es tradueix en concebre la geometria com un sistema generador de formes i de relacions des d'un punt de vista de la programació. Tot i que els algorismes permeten generar tota mena d'objectes, normalment tenen un àmbit d'acció limitat i, per tant, hi ha geometries que genera i modifica amb més facilitat que d'altres i també hi ha un àmbit al qual senzillament no hi pot arribar. Això afecta qui modela perquè el sistema, en facilitar-li la generació d'un cert tipus de formes i dificultar-li la generació d'altres, dona peu a establir preferències basant-se en el sistema de representació i no en les possibilitats constructives i estructurals. Si no s'adverteix aquesta influència conscientment és possible que el disseny pateixi per culpa d'això sense que l'usuari ho pugui controlar. Cal, doncs, ser conscient del funcionament dels aparells amb els quals representem per fer-los servir apropiadament.

En treballar amb algorismes tenim la possibilitat de pensar amb un grau d'abstracció superior al que podíem tenir amb les formes clàssiques. Ara les formes pures són casos particulars de tipologies més generals que són els algorismes i, per tant, la lògica de la geometria s'ha alterat considerablement. Aquesta realitat, que no la podem representar amb un paper, ha aparegut únicament gràcies a l'ús de sistemes digitals, i ni tan sols en tots els casos aquests elements

tenen una expressió matemàtica, sinó únicament en forma d'algorismes desenvolupats sistemàticament per un sistema de computació. És molt important comprendre la vinculació que hi ha entre els algorismes, la forma i els resultats que s'estableix involuntàriament en el món de la informàtica, ja que sinó sense adonar-nos-en patim la subtil influència dels algorismes que fem servir, que a poc a poc van dirigint els nostres passos cap a l'ús d'un cert tipus de formes sense que ens adonem, i al cap dels anys ens acostumem a certes limitacions i acabem perdent la capacitat de donar respostes realment lliures. Aquest fet ens fa víctimes i no autors del sistema de treball. Si prenem consciència d'aquest fenomen i, a més, sabem mínimament com funciona la programació, podem escapar d'aquesta influència per descobrir una major llibertat. Tot i això, per experiència pròpia puc dir que tot sistema digital influencia la manera de pensar si no hi parem prou atenció.

Si, per una banda, trobem aquests perills en l'ús de les tècniques digitals, per l'altra ens ofereixen una capacitat de generació formal molt més rica, que amplia l'espectre geomètric amb què juga l'arquitecte en el moment de prendre decisions i obre la possibilitat de resoldre problemes relativament difícils de geometria de manera automàtica mentre es dedica a altres aspectes de disseny i organització. En aquest sentit, han aparegut tècniques noves de treball que superen la concepció clàssica del dibuix i comencen a plantejar mètodes coherents amb les potencialitats reals dels sistemes digitals, que passen per treballar o bé amb bases de dades o bé amb sistemes de funcions fortament lligats al funcionament intern de les computadores.

1.4.1.2 *Simulacions dinàmiques, programació "tova" i sistemes BIM¹⁹*

En l'àmbit dels sistemes de modelatge en CAD hi ha una tendència creixent a fer servir elements predeterminats a l'hora de modelar. Això permet que el càlcul i tractament específic de cada element es pugui automatitzar en tenir-lo classificat com a objecte concret i desar-hi les instruccions necessàries per generar-lo. Si ens fixem en els sistemes de modelatge BIM, veurem que es parteix d'elements predeterminats relacionats amb la realitat constructiva arquitectònica, mentre que un sistema de CAD convencional ofereix elements bàsic de caire geomètric. Aquest és un dels avantatges principals dels sistemes BIM, que milloren substancialment el procés de modelatge i comprovació de les peces i el conjunt. Aquesta tendència per generar elements predeterminats, però, no s'ha observat únicament en els sistemes BIM, també en els sistemes de simulació física ha aparegut aquest recurs com una manera de facilitar el modelatge amb camps de força. Encara que el plantejament és completament diferent en tots dos casos, la idea bàsica

¹⁹ "Building Information Model" o model d'informació de la construcció.

de generar un bloc d'informació que es modifica d'una manera concreta, en comptes d'un element simple que es modifica de forma genèrica com és el cas dels CAD, hi és igualment present. El que permet treballar amb elements predeterminats és la capacitat de transformar la informació de manera coordinada i controlada i no basar-se únicament en la generació, modificació i eliminació de cada part. En un sistema de CAD convencional no es pot modificar coordinadament les diferents parts d'un element compost de moltes parts, en canvi, tant en els BIM com en els sistemes dinàmics sí que ho podem fer, per això tots dos sistemes tendeixen a generar elements predeterminats.

La diferència fonamental entre el BIM i el sistema de modelatge que plantejo és que mentre els sistemes BIM generalment treballen amb formes paramètriques específiques i sistemes de funcions únics per cada peça, el sistema dinàmic que volem programar partirà generalment d'elements geomètrics genèrics per crear models concrets i, sobretot, farà servir sistemes de modificació genèrics, que combinats donaran lloc a comportaments concrets. Això vol dir que permetran "construir" elements paramètrics. La dificultat que trobem en els sistemes dinàmics té a veure amb els mecanismes de control ja que mentre els sistemes BIM poden ser controlats amb mecanismes molt convencionals, en el cas dels sistemes dinàmics el control és molt complicat quan no es pot passar per la programació directa. En aquest sentit, el problema se suavitza en entrar en escena el segon avenç que té lloc en els últims temps, els sistemes de programació tova per a la generació i control de les formes geomètriques. Aquestes són eines pensades per generar funcions que després es puguin fer servir durant el procés de modelatge, de tal manera que l'usuari no es veu limitat per les eines predeterminades del programa i pot explorar amb molta més llibertat les possibilitats que l'ús de la computació de l'ordinador li ofereix. Aquests mecanismes, que veurem molt per sobre en comentar el funcionament de l'ICE²⁰ (vegeu el capítol 2.4.1) amb Softimage, han obert la porta a la utilització de funcions molt més complexes que les que fèiem servir fins ara i han fet possible controlar sistemes que fins ara només es podien controlar a través de la programació. En el cas dels sistemes dinàmics, durant molt de temps han patit limitacions importants degudes a què per mantenir el control dels objectes quasi sempre calia programar i això impedia que se'n pogués generalitzar l'ús. Amb els sistemes de programació tova tenim l'oportunitat de fer-los servir sense grans coneixements de programació. Tot i això, la programació tova resol només alguns dels problemes que plantegen els sistemes dinàmics, encara falta generar una estratègia general de treball que en permeti l'ús extensiu i complet.

²⁰ "Interactive Creative Environment" o entorn interactiu creatiu.

1.4.2 Integració dels processos dinàmics en un CAD

Com que l'ús dels sistemes informàtics en arquitectura és molt recent se n'ha fet un ús molt bàsic, i s'han extrapolat directament les tècniques manuals de dibuix al sistema digital de manera que, tot i que canvia l'eina, l'estructura metodològica de treball continuava sent la mateixa. Ara, però, aquesta concepció es mostra com un arcaisme resultant d'una certa manca de comprensió del que realment ha implicat la introducció de les eines digitals en el món professional. En realitat, la virtut principal dels sistemes digitals rau en la capacitat per generar, transformar i destruir informació, i cal entendre que la millora en l'àmbit digital no es basa en aproximar-se més al dibuix (exceptuant programes exclusivament dedicats a fer-ho), sinó en aconseguir millores que ens permetin generar més informació, aprofitar millor la capacitat de computació i millorar la capacitat per depurar-la. En realitat, el que més s'hi assembla és la programació, però aquesta no té la capacitat de visualització ni l'agilitat visual i conceptual necessària per introduir projectes de manera rendible. De totes maneres, quan els arquitectes volen establir un ús més profund dels sistemes informàtics no tenen més remei que treballar amb un programador.

1.4.2.1 *Ús més integral dels sistemes digitals*

Tant en els sistemes de simulació física com en els programes paramètrics, descobrim que en realitat busquem maneres d'aprofitar la capacitat de computació de l'ordinador per facilitar, accelerar i optimitzar el procés de modelatge. Aquesta és una tendència general que es posa de manifest en els sistemes paramètrics de modelatge com REVIT, en els quals en treballar amb elements prèviament configurats podem automatitzar la definició geomètrica i estalviar temps de dibuix, problemes de coherència i emmagatzematge de dades concretes no relacionades amb la geometria. Tot això implica una profunda reestructuració del model digital. Aquesta tendència ha permès augmentar a poc a poc el rendiment dels sistemes de modelatge a mesura que anem superant la idea més clàssica del dibuix com un sistema de representació estrictament estàtic. Acceptem que hi ha maneres més dinàmiques d'entendre el model digital com una realitat que es transforma i comencem a buscar processos que ens puguin ser útils de cara al disseny i que es puguin manipular, entendre i modificar fàcilment per un usuari poc expert. Cal tenir en compte que el model ha de ser coherent amb el medi en què el fabriquem i el medi digital és, per natura, un espai dinàmic en el qual la informació es transforma amb una gran facilitat. Dibuixar en un ordinador ja és un procés de transformació de la informació que imita un procés mecànic, però la realitat que sustenta aquesta il·lusió és molt més rica que el procés al qual imita. En assumir aquesta integració dels processos de computació dins el procés de modelatge han aparegut moltes vies amb les quals es poden generar funcions útils:

- Els sistemes de programació tova basats en llenguatges de programació visuals, que pot assumir fàcilment un usuari poc expert. Amb aquests mecanismes es poden generar processos personalitzats que facin funcions relativament complexes de modelatge sobre elements geomètrics.
- Mecanismes de modelatge paramètrics en els quals el model es construeix a partir de peces conegudes per l'ordinador i que aquest pot associar a elements constructius de manera que el càlcul, l'amidament, la transformació i la classificació es poden automatitzar molt més del que ho han fet fins ara. Aquest mecanisme ha permès optimitzar molt el procés de definició de l'obra, però ha pecat d'un excés de rigidesa en la seva definició que el fa molt apte per definir objectes ja coneguts però menys eficaç a l'hora de treballar amb objectes que encara no estan definits. Com que els processos de transformació són específics per a cada peça, el sistema és eficient però rígid i això en llastra l'ús.
- Una tercera via és el plantejament de sistemes en els quals s'intenten generar processos de transformació genèrics que siguin útils per un ampli espectre de casos. En aquest camp trobem tant els sistemes de simulació física com els sistemes genètics d'optimització formal amb els quals es poden generar eines de modelatge.

En aquesta situació, hem optat per imitar els processos naturals de transformació perquè, com veurem, amb aquest sistema es poden generar funcions genèriques capaces de trobar formes òptimes més enllà del cas concret de la catenària i, per tant, es pot aplicar en un ampli espectre de casos que van de les necessitats constructives a les estètiques. Per altra banda, són mecanismes naturals als quals estem adaptats per respondre-hi positivament i que no costen d'integrar dins un procés de modelatge. Això permet que l'usuari no només entengui el model en l'àmbit espacial, sinó que pugui comprendre el procés de transformació que està patint el model; i això és fonamental de cara a tenir una comunicació fluida amb l'usuari, ja que en altres casos, com en els processos genètics o en els sistemes de programació tova, el comportament és molt difícil d'entendre visualment i cal recórrer a algun mètode alternatiu de representació o de codi per desxifrar-ne el funcionament. Aquestes lleis del moviment, en canvi, són extremament senzilles des del punt de vista visual i matemàtic, i es poden modificar per generar simulacions pseudofísiques, tal com fa Daniel Piker amb el mòdul Kangaroo, de manera que les podem adaptar a casos especials i, fins i tot, generar funcions genèriques programades per l'usuari que permetin accedir a una gran varietat de processos de transformació a partir d'un únic esquema.

1.4.2.2 *Compatibilitat amb altres eines CAD*

A diferència del que passa amb els sistemes BIM, en què el model pateix una transformació total en l'estructura interna de la informació que els fa completament incompatibles amb els models tradicionals de modelatge, els sistemes dinàmics, en canvi, mantenen una relació directa amb els sistemes convencionals de dibuix perquè, en realitat, es tracta d'una ampliació del mateix mecanisme i no d'una substitució. Això no implica canvis substancials en la base de dades en el sentit que si bé la geometria convencional fa servir unes posicions $X Y Z$ a l'espai, els sistemes dinàmics només hi afegixen un component de velocitat (V_x , V_y , V_z) i un component d'acceleració (A_x , A_y i A_z), de manera que són sistemes extremament compatibles. Serà, doncs, relativament senzill d'introduir els sistemes dinàmics dins dels sistemes de CAD amb els quals se'n pugui modificar la geometria. Els canvis més significatius els trobarem en les funcions que transformen aquests elements, però això no afecta la base de dades de manera que podem gaudir d'una compatibilitat total amb els models geomètrics.

El punt més conflictiu i on més problemes de compatibilitats trobarem és en l'estratègia de treball, ja que un cop introduïdes les dades dins del programa de dibuix cal integrar les funcions dinàmiques en l'estratègia general de modelatge de l'eina CAD per fer-ne un ús aplicat durant el procés de disseny. En aquest sentit, la manera com es presentin les funcions dinàmiques en el procés de modelatge té un paper central en els possibles usos que puguin tenir.

En la proposta que presento a continuació, el sistema dinàmic intenta estar vinculat a un objecte geomètric senzill de manera que visualment en compreguem el funcionament. En comportar-se d'una manera coherent amb la seva geometria, i seguint una lògica senzilla i visual que tothom podrà seguir, és possible comprendre'l. Els elements bàsics com els plans, les rectes i els nodes generaran forces que es correspondran amb la seva forma davant de les accions externes, de manera que construint un model geomètric també estarem construint un camp de forces. Aquesta vinculació visual i conceptual al mateix temps també permet entendre més ràpidament quin comportament podem esperar d'un disseny, de manera que no hem d'abstraure a esquemes poc intuïtius el nostre model per poder-lo dominar. Per altra banda, com que treballem amb elements equivalents als de molts sistemes CAD podem fer servir eines convencionals de modelatge per establir el control geomètric del model. Abans o després, però, haurem de fer servir algun sistema visual de control, que si bé no hem pogut desenvolupar en aquesta tesi és un recurs que facilita enormement la comprensió i modificació de les vinculacions entre els elements, que en el cas de sistemes dinàmics és essencial.

Per altra banda, un sistema dinàmic necessita elements estàtics per poder retenir el control mètric de certes propietats i, per tant, que ens reguli el moviment de les parts dinàmiques a uns

àmbit concrets. Però treballar amb dues classes de geometria pot ser confús, ja que si hem de crear una geometria base i després enganxar-hi una geometria dinàmica, és possible que aquesta duplicitat comporti complicacions perquè estem acostumats a treballar sempre amb el mateix tipus d'objectes. En aquest sentit, hem solucionat el problema en treballar amb elements que són igualment funcionals, tant geomètricament com dinàmicament, de manera que podem resoldre totes dues geometries amb el mateix tipus d'objectes. Tot i això, aquest punt es posa en dubte tal com veurem al sistema PhysX (vegeu el capítol 2.4.3), en el qual la introducció de diversos tipus de geometria i l'ús d'un sistema intermediari entre el model geomètric i el model dinàmic permet un funcionament molt més àgil del sistema, i potser en comptes de confondre ajudaria a modelar. Per aquesta primera provatura, però, hem preferit considerar l'ús d'un únic sistema geomètric.

1.4.3 Estratègia de càlcul i de modelatge

De cara a generar un motor de càlcul versàtil i eficaç, que pugui interactuar amb l'usuari en temps real i que, a més, sigui prou "resistent" per suportar tota mena de situacions imprevistes en les quals les accions tinguin un paper decisiu en el resultat, ens cal recórrer als sistemes iteratius. Aquests són els mecanismes més robustos dels quals disposem perquè com que no són sistemes lineals són capaços d'adaptar-se als canvis inesperats en els càlculs i integrar-ho tot en el resultat; gràcies a això permeten una certa capacitat d'exploració, cosa fonamental per a un arquitecte. Els sistemes iteratius aproximen el resultat pas a pas, de manera discreta, i en cadascun d'aquests passos l'usuari pot intervenir i alterar el procés. Com que les operacions es repeteixen 20 o 30 vegades per segon, l'usuari té la sensació de treballar de manera contínua sobre un model dinàmic. Com més temps passa des de l'última acció de l'usuari, més equilibrat i precís és el resultat obtingut perquè més cops ha anat aproximant la solució. Fins i tot quan els canvis deixen de ser perceptibles visualment, el sistema continua aproximant més i més la solució. Les alteracions únicament produeixen estats nous que tendeixen a un equilibri diferent, de manera que si podem predir com es comportarà el model hi podem actuar amb propietat. Tot i això, hi ha un fenomen en tot aquest plantejament que genera una certa incertesa, i és que malgrat que pots preveure el comportament general dels sistemes físics, en algunes ocasions és difícil predir exactament com serà aquest resultat. Si el que volem precisament és que el sistema ens resolgui un problema del qual no en coneixem la solució, o no la podem calcular, llavors aquest mecanisme funciona amb molta eficàcia. Però altres vegades ja sabem quina és la solució i volem col·locar un objecte en una posició exacta, i no ho podem fer perquè els camps de força tenen un marge d'incertesa que no ens deixa afinar el resultat. Per resoldre aquest problema hem elaborat tres estratègies bàsiques que ajuden a mantenir la geometria sota control:

- El primer consisteix a poder desactivar el comportament físic d'un objecte de manera que es comporti com una geometria estàtica i que actuï com un sistema CAD convencional. Amb aquesta simple decisió recupero la possibilitat de retenir un control plenament precís del model. Activant i desactivant el comportament dinàmic de diferents parts del model es pot combinar la precisió d'un sistema CAD amb el dinamisme d'un sistema de simulació física. Aquesta eina és fonamental per mantenir sota control un objecte dinàmic.
- Hi ha, però, una altra estratègia que la fem servir per aprofitar la capacitat resolutiva dels sistemes dinàmics sobre geometries relativament complexes sense perdre'n el control. Recordem que els sistemes dinàmics resolen els problemes geomètrics de manera genèrica, i això vol dir que poden oferir solucions en tota mena de situacions. Aquest mecanisme permet al sistema actuar en condicions de fortes constriccions geomètriques, ja que tot i que té la llibertat de moviments molt coartada poden continuar oferint solucions vàlides. Això és el que aprofito quan genero una geometria estàtica auxiliar, que serveixi de guia per a la geometria dinàmica i, per tant, en restringeix la llibertat de moviments a un àmbit concret. Aquesta aproximació permet trobar totes les solucions geomètriques per a un problema concret que es troben sobre aquella geometria auxiliar. Si per exemple generem una superfície d'una certa complexitat i volem resoldre problemes geomètrics sobre la superfície, si restringim la llibertat de moviments dels elements dinàmics a la superfície esmentada els podrem fer servir per resoldre'n tota mena de problemes geomètrics. Com que únicament es mouran sobre la superfície assignada, totes les solucions estaran, per defecte, a sobre. Val a dir que aquest mecanisme també és un sistema de control eficaç perquè és capaç de restringir, de manera molt concreta, el moviment dels elements i, per tant, ofereix la possibilitat d'eliminar l'àmbit de treball als plantejaments de l'usuari.
- Finalment, cal poder regular els camps de força de manera que equilibrant les seves accions puguem ajustar la geometria del model amb un cert grau de precisió. Aquest sistema és imprescindible en la fase de definició del model, però encara no hem estudiat la capacitat que té per donar solucions exactes.

Si hem establert una geometria de base ens cal generar les peces dinàmiques que s'hi moguin a sobre. Per això necessitem treballar a partir d'elements predeterminats, que ens permetin generar ràpidament estructures dinàmiques que es relacionin amb els elements estàtics. Un cop fet, estarem treballant amb elements compostos en els quals hi ha igualment elements estàtics i elements dinàmics. A partir de la combinació de diferents elements predeterminats es pot construir un element més gran que doni lloc a un model final de gran complexitat geomètrica,

compost de diferents elements dinàmics, cadascun amb un comportament determinat pel mateix usuari que es modificarà d'acord amb les exigències del projecte.

Arribats al punt on el procés bàsic de definició geomètrica ha quedat clarament definit podem donar el pas següent i configurar el que seran les propietats dels objectes que regularan tant aspectes geomètrics com de comportament dinàmic de les peces. Tant si es tracta de la massa, de la intensitat dels camps de força o de qualsevol altra propietat, ens cal poder-la regular amb la màxima facilitat per mantenir contínuament sota control el procés de transformació dinàmic i, així, poder modelar amb la màxima facilitat. Aquí caldrà oferir un quadre de propietats que sigui complet i amb una funcionalitat àgil. És molt habitual que es doni la situació en la qual vulguem tractar una o diverses propietats d'un o diversos elements de manera reiterada. Com que seleccionar més d'un cop els elements és molt molest i, a més, amb sistemes dinàmics té una dificultat afegida, hem plantejat un mecanisme en el qual les propietats dels elements es poden aïllar tant de manera individual com col·lectiva. Això fa que no calgui seleccionar els objectes cada cop que volem canviar-ne una propietat, sinó que n'hi ha prou a fer-ho un cop i aïllar la propietat. Per altra banda, aquesta estratègia permet que elements de geometria relativament complexa, com pot ser una façana de mur cortina, es puguin controlar a partir de pocs paràmetres simplificant enormement la tasca de modificar-los i adaptar-los a les diferents situacions d'un model en plena fase de concepció i modificació.

1.4.4 Introducció de dades

1.4.4.1 *EI GUI*²¹

En llenguatge informàtic GUI és l'acrònim de *Graphical User Interface* i significa tot allò que ens permet relacionar-nos amb un sistema digital a partir de la pantalla. Aquesta aproximació ha substituït els primers mecanismes de treball que es basaven en la introducció de comandes escrites a l'ordinador. Encara hi ha molts usuaris que fan servir les comandes perquè tenen alguns avantatges a l'hora de relacionar-se amb la màquina i són més directes. Fer sistemes gràfics en general no és únicament un problema de facilitat de relació, sinó que permet transmetre informació molt ràpidament fent més fluida la interacció general. Això permet que es realitzin tasques molt més complexes que amb comandes no serien possibles. Aquest és un aspecte important de l'estratègia d'un programa ja que condiciona la metodologia general d'introducció de dades, el ritme de treball i la facilitat d'ús general.

²¹ "Graphical User Interface" o Interfície gràfica d'usuari

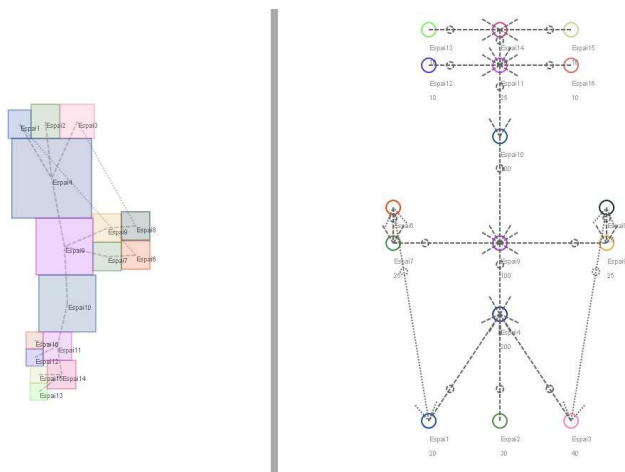


Fig. 1. Programa de relació entre espais a partir de grafs creat per una aplicació en la qual un esquema funcional es transformava en una distribució de forma directa.

Val a dir que un sistema mal plantejat en aquest sentit pot generar molta confusió en no tenir una metodologia homogènia de treball, i això dificulta que s'introdueixi i es modifiqui el model i que disminueixi la capacitat del sistema per plantejar propostes. També pot ser que dificulti l'ús d'algunes eines i en faciliti l'ús d'altres, cosa que indicaria un sistema mal equilibrat que condicionarà l'usuari en un sentit o un altre (per exemple, afavorir la línia recta enfront de la corba). En aquest sentit, la proposta es relaciona a partir de dos mecanismes convencionals però necessaris que són els quadres de propietats i les barres de menús. Però faltaria implementar el que seria un sistema visual de relació entre elements, similar al que fan servir Grasshopper o Softimage. Tot i això, anteriorment hem experimentat amb aquests mecanismes en altres aplicacions que també incloïen sistemes dinàmics i el resultat va ser molt bo.²²

En el cas mostrat a la figura 1, a partir d'un esquema de grafs es generaven una sèrie d'espais rectangulars o quadrats que sense tocar-se es posaven en contacte seguint l'esquema indicat. L'usuari podia estirar o modificar el resultat sense perdre l'esquema de relacions preestablert. Aquest mecanisme és clarament funcional i, a més, demostra la compatibilitat dels sistemes de relació gràfics amb els sistemes dinàmics de manera funcional. Aquest mecanisme també facilita enormement la tasca d'establir relacions entre objectes dinàmics, que és essencial de cara al seu control tècnic. Però potser el més important és que permet transformar esquemes funcionals en propostes de disseny formal, cosa que integraria còmodament la fase de disseny dins els sistemes digitals mantenint la vinculació directa amb el projecte definitiu; potser fins i tot seria possible que qualsevol canvi en el programa es traduís immediatament en un canvi volumètric coherent. En aquest sentit, les possibilitats són molt grans i cal una tasca d'investigació important que en aquesta tesi s'ha reduït a la capacitat dels sistemes dinàmics per generar formes. Tot i

²² Vegeu l'annex 2.

això, l'estudi dels sistemes GUI en els programes d'aplicació en arquitectura és un tema clau per al futur de l'arquitectura.

1.4.4.2 *Introducció de la geometria*

Tal com hem vist, el model geomètric estàtic serà més una guia que no pas un resultat, de manera que només tindrà un valor relatiu i partir d'unes dades inicials el conjunt es transformarà en un nou element que mantindrà les relacions amb l'esquema estàtic. Hem d'entendre aquesta estructura inicial com una base a la qual s'agafaran una sèrie d'objectes dinàmics que es mouran per mitjà de simulacions físiques; així, mentre la base ens interessa que sigui un element estàtic, molt més fàcil de controlar, els elements que s'hi agafen haurien de ser dinàmics encara que, pel plantejament del programa, en realitat siguin la mateixa mena d'objecte amb la propietat dinàmica activada o desactivada. Aquesta serà, doncs, una propietat definida per l'usuari de manera que treballarem amb un únic element, que pot tenir dos estats. La generació de la geometria base es farà a partir de nodes, rectes, plans, i superfícies NURBS (vegeu el capítol 3.2.7), amb les quals definirem els llocs geomètrics per on es mourà la forma dinàmica. D'aquesta manera restringirem el moviment de les peces per mitjà d'un model esquemàtic i obligarem el sistema a optimitzar les formes dins d'uns paràmetres concrets i visualment fàcils d'entendre. Per introduir, doncs, aquesta geometria estàtica farem servir mecanismes de dibuix 3D emprats generalment en el món del CAD, que permetin plantejar un model ràpid amb la màxima senzillesa.

Per introduir amb precisió dades geomètriques cal dominar 3 paràmetres essencials que defineixen una posició a l'espai: les coordenades, els angles i les longituds. Amb aquests tres elements controlats podem establir fàcilment les posicions relatives o absolutes de nodes en un espai tridimensional. En aquest sentit, els sistemes convencionals de modelatge en CAD han treballat profusament aquests aspectes, de manera que han plantejat sistemes extremament acurats, senzills i ordenats de situar, amb control i amb el mínim de dades necessàries, les coordenades dels nodes de manera escrita o visual. Tot i que el paper de les barres de comandes continua sent dubtós, hi ha molts usuaris, i certs aspectes del control geomètric, que requereixen l'ús d'aquesta mena d'aproximació tot i que en un primer moment, i per a un usuari poc expert amb una incidència tècnica poc important, els sistemes enterament visuals poden complir una gran part de la feina necessària per al modelatge. Per altra banda, les dades visuals ofereixen una agilitat que permet simplificar tasques que amb barra de comandes serien molt abstractes. Això obre les portes a un domini més directe del model que permet plantejar formes

més complexes. Per tant, en conjunt els sistemes visual i els sistemes de comandes es complementen entre si per donar un domini molt complet de l'aparell.

En aquesta proposta, la introducció de dades geomètriques es realitza a partir de la introducció de coordenades geomètriques a l'espai. El procés és basa en una estratègia visual i es poden introduir algunes dades escrites com la longitud. A partir d'aquí es va definint una estructura de filferro on s'estableixen relacions entre nodes que podran ser rectes, plans, corbes i superfícies NURBS (vegeu el capítol 3.2.7). Els elements dinàmics s'introdueixen com si fossin elements geomètrics; aquest és el cas dels plans i les rectes que es representen com elements purament geomètrics tot i que després produiran camps de força que intentaran precisament retenir la seva geometria. En el cas dels elements NURBS, passa una cosa similar tot i que la relació és una mica més complexa, ja que si bé les partícules tendeixen a adherir-se a la superfície corba, la superfície roman estàtica. Per tant, tenim un conjunt d'elements que són geometries i camps de força al mateix temps. Val a dir que no totes les forces es poden plantejar com un element geomètric; per exemple, les dinàmiques de grup, les forces que actuen sense límits definits, les forces que mantenen el paral·lelisme, l'equidistància o una relació angular, no es podran visualitzar d'una manera convencional. Representar, doncs, aquests elements sense trencar la lògica visual dels sistemes CAD és un repte al qual ens hem d'enfrontar en desenvolupar aquesta aplicació. Recordem que els aspectes visuals poden facilitar molt el treball i no s'han d'entendre com un simple "complement", sinó com una eina central. En aquest sentit, el problema de la representació de forces que no tenen una correspondència directa amb formes geomètriques conegudes és un punt complicat si no es fan servir sistemes de grafs.

1.4.4.3 *Introducció de camps de força*

A diferència de la introducció de dades geomètriques, controlar camps de força i interaccions físiques en arquitectura és un tema que no s'ha tractat en el modelatge més enllà dels plantejaments puntuals de comprovació que els programes d'estructures ofereixen des de fa dècades. Per això, necessitem reflexionar sobre les implicacions que comporta treballar en temps real amb interaccions que modifiquen automàticament el model i com mantenir-les sota el control de l'usuari de manera senzilla i amb el mínim de dades possible. Com a solució hem optat per un sistema convencional de quadres de propietats més o menys flexible amb el qual treballarem. Com que la introducció en el model de camps de força ha de ser al més intuïtiva possible, de manera que no calgui un alt grau d'abstracció per comprendre què s'està fent, hem intentant assimilar la geometria convencional i la dinàmica amb una única representació. Si no es fa així es pot caure en l'error de necessitar un esforç excessiu per poder generar elements molt bàsics. Perquè això no passi s'estableix una relació entre la geometria i el camp de força quan

tots dos aspectes es mostren compatibles entre si. En aquest tipus de plantejament trobaríem les partícules (que són assimilables a forces puntuals), les rectes (que serien assimilables a forces lineals com els *mass-spring*) i els plans (que es podrien assimilar a una força que manté tots els nodes sobre el mateix pla mitjà) com elements bàsics la representació i tractament dels quals seria igual pel que fa a la geometria i com a camp força. Tot i això, trobarem que les partícules són un cas lleugerament ambigu ja que tot i que es poden entendre com a forces puntuals també poden ser forces que actuïn en una direcció; llavors s'entenen molt millor si es representen com a vectors. Amb això es combina el modelatge geomètric amb la introducció de forces sense afegir cap complicació especial, de manera que modelar no només implica generar una forma sinó que també vol dir establir unes relacions sense dificultats afegides. En realitat aquest plantejament és molt més proper a nosaltres que no pas la generació d'elements abstractes i ens permet aprofitar moltes estratègies de CAD convencional per generar (però no controlar), de manera senzilla, els camps de força bàsics.

Les forces que no tenen una correspondència directa amb elements geomètrics no es poden representar gràficament de manera intuïtiva. En aquests casos, un sistema de control mitjançant relacions gràfiques, com el que s'ha mostrat en el cas dels grafs, seria molt adequat ja que no poden ser entesos com un element sinó com una relació. La manera de seleccionar i modificar aquests elements ha quedat com a tema pendent en el desenvolupament de l'aplicació i, per tant, hem pogut experimentar amb l'ús des d'aquesta aproximació. Així, aquests elements queden representats esquemàticament en el programa per poder-ne visualitzar i seleccionar les propietats encara que no sigui la millor solució.

2 Estat actual de la qüestió

2.1 Fets rellevats en l'ús de mecanismes físics de disseny

2.1.1 El teorema de la catenària inversa

La idea de derivar la forma d'un arc de les tensions que en ell actuen va ser pròpiament enunciada al segle XVII amb la formulació del teorema de la catenària inversa com una metodologia per trobar la curvatura d'arcs estructurals. Aquest principi va ser enunciat per Robert Hooke a l'any 1675 ²³, i en la formulació es torna evident la relació inversa que mantenen la curvatura de cordes i altres objectes lineals i flexibles sotmesos al seu pes propi amb la curvatura d'arcs que treballen només a compressió, encara que llavors no hi hagués una explicació matemàtica clara del fet. Tots sabem que en agafar una peça flexible de roba o una corda pels seus extrems es generarà espontàniament un sistema tènsil que només treballa a tracció i que acostuma a generar una curvatura més o menys pronunciada segons la tensió amb la qual estirem els seus extrems o el seu pes propi. Aquesta corba acostuma a ser el reflex sobre el pla horitzontal d'una estructura rígida que actués de manera anàloga però a compressió. De manera que si establim una correlació podem extrapolar el comportament del model a tracció al model a compressió. Aquest disseny és especialment atractiu per optimitzar la construcció amb materials que només treballen a compressió com la pedra o el formigó, ja que els estats tensionals obtinguts amb aquest mètode només treballen en un sentit ja sigui compressió o tracció, però difícilment una barreja significativa de tots dos. Amb aquest coneixement Hooke va escriure la famosa frase que en forma d'anagrama en llatí, deia "Com penja una corda flexible, així es comportarà a la inversa un element rígid"²⁴.

Al 1694 David Gregory va enunciar per primer cop la idea de que si els arcs i les voltes amb formes no derivades de la catenària s'aguanten és perquè tenen una catenària al seu interior sent aquesta la primera formulació del teorema de l'estabilitat en una forma molt primitiva i sense demostració. Aquesta idea es començarà a desenvolupar a nivell tècnic al 1704 quan Johann Bernoulli²⁵ dona la primera formulació matemàtica al problema. Més endavant, al 1725, l'obra

23 Serrallonga, J., *Geometria i mecànica en els models de Gaudí* 2003 ETSAV, Dept. Estructures a l'arquitectura, Sant Cugat del Vallès. **Pag 255**

24 Serrallonga, J., *Geometria i mecànica en els models de Gaudí* 2003 ETSAV, Dept. Estructures a l'arquitectura, Sant Cugat del Vallès. **Pag 86**

25 Huerta Fernández, S., "El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí" 2003 *Ingeniería Civil* (130). pp. 121-133.

pòstuma de Pierre Varignon (1654 - 1722) "*Nouvelle mécanique ou statique*" exposa la idea de polígon de forces i com amb aquest es pot generar la curvatura d'una corda penjant. Aquesta aportació serà fonamental de cara al futur, especialment per al desenvolupament de l'estàtica gràfica en la qual caldrà demostrar que un sistema gràfic pot realitzar un càlcul de natura matemàtica. Tot i això el primer ús pràctic d'aquest principi el trobarem en Giovanni Poleni, que a l'any 1743 realitza un estudi sobre les causes d'unes fissures aparegudes en la cúpula de sant Pere al vaticà, fissures que eren verticals i que van fer témer per l'estabilitat del conjunt. Poleni va utilitzar una corba catenària contraposada a la secció de Sant Pere per demostrar que aquesta s'adaptava amb prou naturalitat a la baixada de càrregues segons el teorema de la seguretat que va assegurar que l'estabilitat de la cúpula no perillava i que únicament calien unes grapes per reforçar l'estructura.

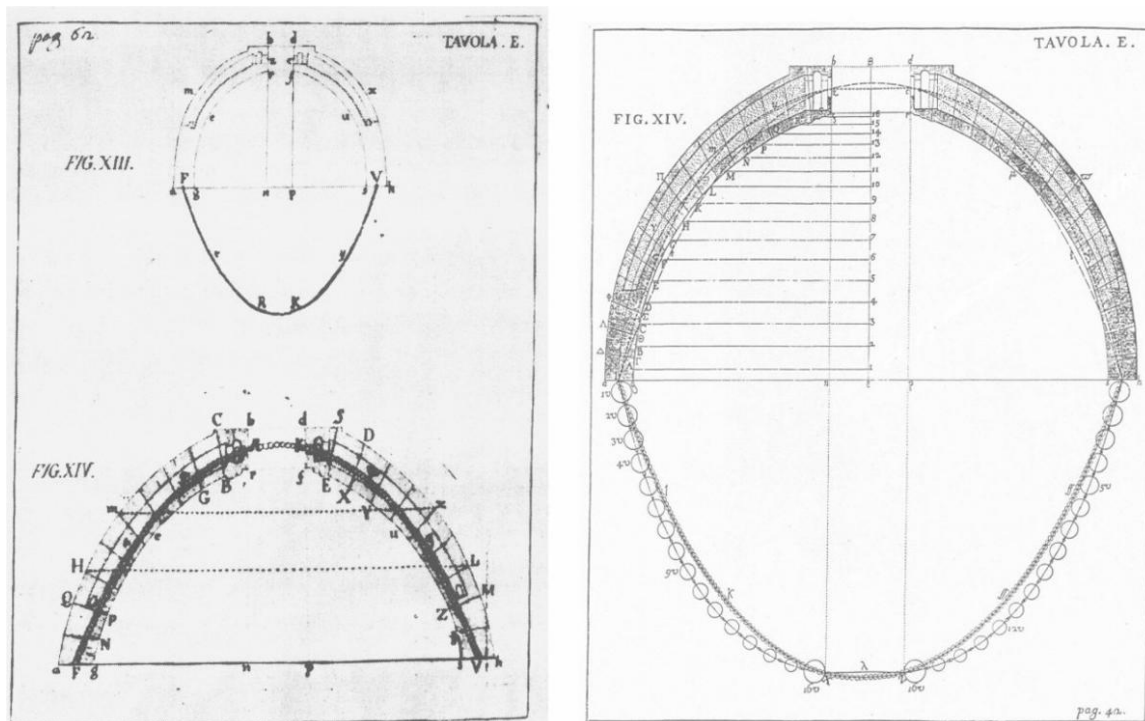


Fig 2. Aplicació de la corba catenària sobre la secció de la volta de Sant Pere realitzats per Poleni.

Mentre aquest procés de restauració tenia lloc a el vaticà, al 1744 Euler demostra que les superfícies derivades de les corbes catenàries generades per la revolució d'aquestes al voltant d'un eix són superfícies mínimes. A aquests cossos els anomenarà catenòides per ser derivats de la catenària i sempre tindran aquesta propietat quan es revolucionen seguint un cercle. El concepte de superfície mínima implica que per a un contorn donat no hi ha cap superfície de menor àrea que la donada. Aquesta propietat les fa una classe de geometries excepcionalment útils en arquitectura degut que minimitzen l'ús de material per una superfície determinada, fent

l'estructura més lleugera i econòmica al mateix temps. És per tant una propietat desitjable en certs tipus d'estructura com les malles tènsils. Aquestes aportacions van començar a tenir finalitats pràctiques de cara al disseny de les arcades dels ponts, que van ser els primers casos d'aplicació directa d'aquest principi.

2.1.2 Aportacions del segle XIX i l'estàtica gràfica

Però al segle XIX es desenvoluparà molt més aquesta temàtica i veurem que s'assentaran les bases per a que puguin tenir lloc futures aplicacions d'aquest mètode. De les investigacions que es duren a terme se'n derivarà l'Estàtica gràfica i el teorema de la seguretat que trobarà aplicacions en el món de l'enginyeria i l'arquitectura. Les bases de l'Estàtica gràfica ja havien estat enunciades al 1725 amb la publicació pòstuma de Pierre Varignon. Però l'impuls definitiu no tindrà lloc fins un segle més tard, el 1858 i el 1864 Rankine i Maxwell respectivament faran les primeres aportacions a Anglaterra mentre que a Europa serà l'enginyer Carl Culmann qui al 1866 desenvolupa a fons la metodologia aplicant-la al càlcul amb acer tant per a cobertes com per a ponts. En el llibre anomenat "*Die graphische Statik*" Culmann demostra la reciprocitat que hi ha entre el polígon funicular i el polígon de forces es tornaren tot un referent a partir de 1870 quan es va difondre per tota Europa l'ús d'aquestes tècniques. També cal remarcar les aportacions de James Clerk Maxwell i la posterior generalització del seu mètode que en farà Luigi Cremona que ampliarà el diagrama de forces internes per a gelosies de Maxwell que més endavant es coneixerà com a diagrama de Maxwell-Cremona ²⁶. Aquest mètode permet combinar els polígons de forces de tots els nodes en una sola figura simplificant així la determinació de les càrregues. Així, doncs, tota una generació d'enginyers es veuran fortament influenciats per l'estàtica gràfica i val a dir que aquest serà un dels mètodes que farà servir Gaudí per calcular la curvatura dels arcs i les voltes que trobem a moltes de les seves obres. En aquest període també trobarem en arquitectura algunes aportacions influenciades pels estudis sobre estàtica gràfica com seria el cas de Wilhelm Tappe²⁷, en aquest sentit és el primer a plantejar una arquitectura senzilla formada d'arcs parabòlics i cúpules ogivals, molt similars a les quals més endavant faria Gaudí, i de la mateixa manera que ell l'acaben portant cap a les formes naturals. Tot i això la metodologia d'aplicació de Wilhelm difereix considerablement del que serà Gaudí ja que li manquen gran part dels avenços teòrics que eren necessaris per al correcte desenvolupament del mètode. A partir del 1890 l'estàtica gràfica va començar a declinar en favor dels càlculs analítics amb la formulació definitiva de la teoria clàssica del càlcul estructural. Deixaria darrera seu un llegat

²⁶ Jaramillo Jimenez, J.O., *Análisis clásico de estructuras*, 2004, Universidad nacional de Colombia, UniBiblios, p.28-32

²⁷ Huerta Fernández, S., "El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí" 2003 *Ingeniería Civil* (130). pp. 121-133. **Fig-5**

important sobretot en la construcció de ponts i altres estructures, sent potser la torre Eiffel el cas més emblemàtic realitzat amb aquesta metodologia i que va dissenyar l'alumne de Culmann, Maurice Coechlin.

2.1.3 Alguns arquitectes del segle XX que s'han basat en mecanismes físics

Totes aquestes aportacions del segle XIX es convertiran en eines de disseny al s. XX un cop que les idees han tingut un cert temps per assimilar-se plenament. A continuació exposo les experiències d'alguns d'arquitectes que han fet servir el principi de la catenària inversa de cara a conèixer com van entendre i com van fer servir els sistemes basats en la física com a eines de disseny. Aquests arquitectes són alguns però ni molt menys tots el casos que podem trobar. En qualsevol cas són prou representatius com per donar pistes del potencial formal que s'amaga darrera d'aquest sistema i convé tractar-los amb un cert deteniment de cara a estudiar com han donat una sortida vàlida a aquest principi en arquitectura.

2.1.3.1 *Gaudí*

Hereu de totes les aportacions alemanyes fetes durant el s. XIX, Gaudí comença a elaborar el que serà la seva metodologia de treball en la qual de manera sistemàtica es fan servir recursos de l'estàtica gràfica i el principi funicular a nivell pràctic per obtenir la forma dels seus dissenys. En totes les seves obres valent-se d'aquests dos recursos podia extreure dades essencials amb les quals poder aproximar la forma ideal de l'objecte que volia construir. Però l'aportació més important a nivell metodològic, a part de fer-ne un ús sistemàtic a nivell pràctic, és que va ser capaç d'aplicar el mètode a tot el disseny de manera general, trencant així amb l'ús puntual amb que s'havia fet servir fins aleshores. Si fins llavors (amb algunes excepcions com la de Tappe) el sistema d'estàtica gràfica només s'aplicava com a comprovació d'un model preexistent, ara per primer cop era el motor principal a partir del que es plantejava el disseny. Però Aquesta aproximació tant tècnica, que demanava un important procés de reflexió estructural i d'esforç experimental, és evident que d'alguna manera va saber-li donar un valor que anava més enllà, és possible que escollís aquest mètode perquè podia resultar estèticament satisfactori i per tant el procés tècnic no fos més que una "excusa" per justificar aquesta mena de formes, ja que de vegades les feia servir sense necessitat real, també pot ser que aportés una cosa molt més important i és la vinculació intrínseca en un mateix mètode d'una estètica particular i un procés d'optimització de manera que una única manera de fer ho impliqués tot. En qualsevol cas és interessant fer notar que tot i ser un procés tècnic i un xic involuntari, la mà de l'autor es deixa

veure i volem remarcar aquest fet, ja que en totes les seves obres podem reconèixer el seu estil, encara que partís d'un principi mecànic per generar la forma. També en els sistemes de simulació que farem servir l'usuari no té un control total del resultat però esperem que això no impliqui que l'autor no es pugui expressar a través d'ells. Relacionat amb aquesta reflexió podem llegir el que diu Mutsuro Sasaki a les conclusions de l'article d'Alejandro Bernabeu "the method is not important, is the motivation that is important. It is a tool you need to control, if you don't know the architectural rules, no matter what, you get a Frankenstein" ²⁸. Per tant és una eina, i com a tal pot ser millor o pitjor segons qui la faci servir.

En l'aspecte tècnic la representació i càlcul de les corbes catenàries quan estaven sotmeses a esforços requeria d'una considerable inversió de temps i esforç, ja que si bé les tècniques de càlcul gràfic ja permetien una comprovació del model, no era en si mateix una eina de disseny si-nó que en general s'entenia com una eina de comprovació d'un model preexistent i que per tant no estaria sotmesa a un procés de prova i error. El resultat és que els sistemes analítics de càlcul no sempre oferien l'agilitat necessària com per projectar amb ells tal com explica l'article de Santiago Huerta sobre el càlcul estructural en Gaudí:

"Las catenarias transformadas podían trazarse tras complicados cálculos matemáticos, o bien empleando métodos gráficos iterativos o modelos colgantes. Gaudí necesitaba una herramienta de proyecto, que permitiera realizar cálculos rápidos y variar el proyecto a voluntad. Los cálculos matemáticos, necesariamente tediosos en aquella época, contradecían estos requisitos." ²⁹

Aquesta mancança del sistema que no permetia modificar ràpidament un model, va portar Gaudí a desenvolupar un sistema propi per calcular la curvatura de les voltes i els arcs a partir de dibuixos sobre casos senzills i anàlisi de fotografies extretes de models físics. Per calcular les curvatures dels arcs sotmesos a diferents accions es podia fer servir un sistema mecànic en el qual mitjançant cordes i pesos s'anava canviant la configuració de les càrregues (pesos propis i sobrecàrregues) fins a obtenir una corba resultant que podia aproximar-se considerablement als resultats matemàtics. Aquest mecanisme iteratiu en el qual el pes propi de la corda s'anava ajustant fins a obtenir l'estat d'equilibri li permetia extrapolar les curvatures de les voltes

²⁸ "El mètode no és important, la motivació és important. Has de controlar l'eina, si no coneixes les lleis de l'arquitectura, no importa el que facis servir, obtindràs un Frankenstein" Bernabeu Larena, A., "Shape design methods based on the optimisation of the structure. Historical Background and Application to Contemporary Architecture", May 2009 *Proceedings of the third international congress on construction history*, Cottbus,.

²⁹ Huerta Fernández, S., "El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí" 2003 *Ingeniería Civil* (130). pp. 121-133. **Pag-124**

obtingudes amb cordes en els seus dissenys a gran escala a través de fotografies de les quals després en feia amidaments. Segons el cas podia interessar més fer servir sistemes d'estàtica gràfica ja que quan les accions sobre l'arc no responien totes a la mateixa direcció no era possible aplicar el mètode de manera tant directe.

El problema de la resolució de voltes és un problema més difícil ja que si bé el càlcul dels arcs es podia donar en un plànol de dues dimensions, en el cas de les voltes el resultat ha de tenir lloc en un model tridimensional. Aquest problema havia estat resolt per l'estàtica gràfica en calcular les voltes a partir de múltiples talls realitzats a les seves seccions³⁰ però com havia passat anteriorment, els mètodes eren entesos des de la perspectiva de la comprovació i no com a sistema de generació. A causa d'això Gaudí necessita desenvolupar un sistema que li permeti obtenir la forma ideal d'entrada i després treballar sobre aquesta. Amb aquesta idea genera un model físic espacial compostat de diferents arcs (en el fons una aplicació del model d'anàlisi per talls) però entrecreuats formant el que seria la superfície d'una volta. Tot i això ell volia anar una mica més enllà i pretenia calcular voltes asimètriques en suports també asimètrics de manera que l'estàtica gràfica ja no podia oferir solució directa i calia un procés iteratiu. En aquest context planteja els models basats en cordes entrecreuades o teles per poder simular el comportament de les voltes carregades i va ajustant el pes propi de manera que s'obtingui un model equilibrat entre les carregues i el model treballat. A partir de fotografies dels models obtinguts podia més endavant extreure les dades necessàries per al projecte.

En el cas de la Sagrada Família veiem que Gaudí aplica el mateix principi que avans feia servir a l'espai però gràficament sobre el pla. Però a més hem sembla de suma importància mencionar que per poder fer el càlcul de l'estructura divideix l'element en "blocs" dels quals va calculant el centre de gravetat i amb els quals va composant les parts principals de la construcció ³¹. L'objectiu en aquest cas és aconseguir que les càrregues arribin a la base dels pilars de manera que l'estructura quedi equilibrada. Fixem-nos que Gaudí està separant l'estructura en parts, i calculant cada element per separat aconsegueix que en conjunt tots ells compleixin una condició general. Veurem més endavant que aquesta aproximació pot ser molt útil de cara a modelar elements complexos amb sistemes dinàmics, però per raons molt diferents a les exposades per Gaudí, ja que en el cas exposat aquesta estratègia permet controlar millor les relacions dins del model, que si es fes d'una peça seria d'una excessiva complexitat.

30 Huerta Fernández, S., "El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí" 2003 *Ingeniería Civil* (130). pp. 121-133. **BOVEDAS Y EDIFICIOS, MODELOS COLGANTES"**

31 Serrallonga, J., *Geometria i mecànica en els models de Gaudí* 2003 ETSAV, Dept. Estructures a l'arquitectura, Sant Cugat del Vallès. **Pag 353**

En conclusió veiem que les raons que van portar a Gaudí a desenvolupar sistemes àgils de treball neix de la idea de fer servir el que fins llavors eren només sistemes de comprovació com a motor de generació formal. En donar aquest pas li cal realitzar modificacions importants en la metodologia de treball que el porten a proposar una manera pròpia de fer servir el que ja es coneixia. Per altra banda, en el procés de disseny, cal agilitat i capacitat de comprovació cosa que va saber resoldre amb una metodologia que incorporava aquests dos aspectes. L'agilitat és, doncs, essencial i així ho demostra el fet de que l'ús de sistemes generatius, amb la pràctica, van tendint a tornar-se més àgils de cara a la confecció del model perquè aquesta és una de les necessitats principals. Un altre aspecte important a ressaltar és que Gaudí fa servir una metodologia "mecànica" per generar morfologies sense que per això els seus models deixin de tenir un estil propi clarament marcat. No per ser un sistema mecànic hom deixa de poder-se expressar plenament a través d'ell. Això hem sembla molt significatiu de cara a l'ús de sistemes mecànics de computació aplicats al disseny. De la mateixa manera que nosaltres ara mateix, amb els sistemes de computació, tenim una major capacitat d'automatitzar processos, això no té per què implicar que perdrem la nostra empremta en els resultats sinó ben al contrari, que els puguem fer molt més extensius.

2.1.3.2 *Frei Otto* ^{32 33}

En una línia similar d'investigació cal mencionar les aportacions de Frei Otto que va desenvolupar durant la segona meitat del s. XX. La seva formació accidental com enginyer, degut al seu paper com aviador a la segona guerra mundial, li va permetre afrontar la lògica estructural amb gran propietat tot aplicant als seus coneixements d'arquitectura. En aquest àmbit es va dedicar sobretot a l'optimització de les estructures partint de la imitació de les estratègies de formació de cossos naturals. De la mateixa manera que ho havia fet Gaudí prèviament, Frei Otto unifica l'estratègia estructural amb el disseny general per donar lloc a un tot coherent, en el qual l'estètica i la solució òptima no entren en contradicció mútua. Però si en Gaudí podíem observar que els generadors formals del projecte són, per una banda, d'inspiració naturalista i per l'altra es basen en el joc hàbil amb la geometria clàssica, en el cas d'Otto el plantejament sembla allunyar-se definitivament de la geometria clàssica per utilitzar exclusivament la lògica natural com a única guia per l'obtenció de la forma. L'aplicació d'aquest criteri es fa d'una manera molt neta sense afegir cap element de decoració que no neixi d'un requeriment estructural. Aquest plantejament, que és propi del binomi enginyer/arquitecte, intenta unificar en

³² <http://www.yeul.net/Finding%20Form.pdf>

³³ <http://www.tensinet.com>

una única metodologia de treball la resolució de diversos aspectes de l'edifici de manera que no sigui possible la dissociació de l'estètica i el funcionament.

Otto també trenca amb l'arquitectura cúbica i pesada per passar a plantejar l'ús de sistemes molt més lleugers d'estructures sinuoses de malla o tèxtils. Aquests sistemes tenen la propietat de poder treballar exclusivament a compressió o tracció, i per tant amb un comportament general molt més uniforme que els plantejaments tradicionals. Això estalvia complicacions estructurals i dóna molta més resistència davant de situacions límit. Precisament la natura s'ha mostrat molt experta en resoldre problemes complexos perquè els formula en els termes adequats. Principalment tendeix a simplificar els problemes i no acostuma a basar-se en elements únics sinó en la multiplicitat de peces que segueixen criteris únics per respondre moltes situacions a base de repeticions i variacions sobre un tema. Així amb estratègies senzilles i versàtils supera problemes que nosaltres amb prou feines arribem a entendre. Segurament aquest és el potencial del que Otto volia servir-se en estudiar les estructures naturals, però per poder-ho fer tenia que trobar un mètode que li dones la disposició general dels elements perquè treballessin amb aquesta mena de criteris. De moment no tenim clar com es produeixen les formes a la natura, sembla que hi han criteris fractals i altres factors, encara no ben estudiats, que afecten a la disposició de les parts, però queda palès que la natura resol amb extrema facilitat problemes d'estabilitat amb estructures auto generades. En aquest sentit Otto intenta recuperar aquest aspecte auto generatiu a partir de l'ús de models físics que s'adapten a condicions geomètriques concretes i que generen espontàniament formes amb propietats de molt interès estructural. Alguns dels models que Otto fa servir difereixen considerablement de les experiències que havíem observat en Gaudí quan feia servir cordes i sistemes de pesos combinats per obtenir la curvatura dels seus arcs i voltes.

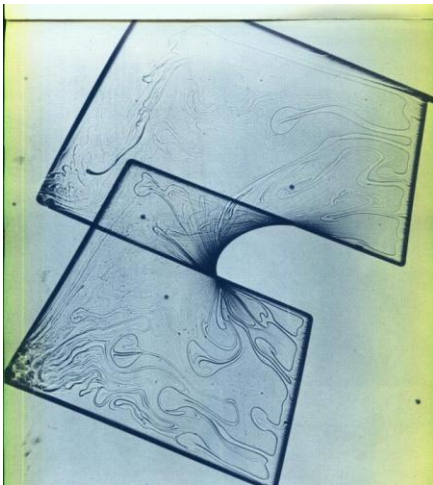


Fig 3. Experiment de Frei Otto amb un contorn tridimensional en el qual podem veure com la pel·lícula de sabó ha generat una superfície mínima.

Per exemple, va mostrar un gran interès en la tensió superficial com a mecanisme generatiu tal com podem observar en les bombolles de sabó i en les capacitats d'aquests elements per generar superfícies mínimes amb contorns relativament complexos. L'estudi amb bombolles de sabó a nivell tècnic com a sistema de resolució geomètrica comença I segle XIX amb les aportacions del científic belga Joseph A. F. Plateau el qual va buscar les

lleis que governaven la formació d'estructures amb bombolles de sabó. D'aquest estudi va deduir una sèrie de principis que semblaven repetir-se en tots els casos:

- Les bombolles de sabó sempre fan superfícies el menys abruptes possible.
- La curvatura en qualsevol punt de la seva superfície és constant.
- Quan tres pel·lícules de bombolla es toquen formen angles de 120 graus entre elles al llarg d'un eix anomenat la vora de Plateau.
- Finalment, les vores de Plateau s'ajunten en grups de quatre formant angles de 109,47° entre elles (angle del tetràedre).

A aquestes propietats cal afegir que generen sistemàticament superfícies mínimes a partir d'un contorn donat de tal manera que en generar una bombolla de sabó adequada podrem obtenir la superfície mínima que millor s'adapta a qualsevol vora, cosa que té interès a nivell estructural i d'optimització de grans superfícies tèxtils. Aquests principis van interessar a Otto que també estava treballant en estructures bàsiques d'habitatge primitiu com les conegudes iurtes mongols o els tipis dels aborígens nord americans. En aquesta mena de plantejament la superfície mínima juga un paper molt important en l'estalvi de material i de pes propi de manera que els models que anava obtenint amb les bombolles de sabó tenien una aplicació directa en aquesta mena de dissenys.

Un altre aspecte en el qual és va interessar Frei Otto era en les estructures de branques que podem observar amb profusió a la natura. Aquests mecanismes estan íntimament vinculats a la generació d'un cert tipus de fractals, cosa habitual en les formes naturals, i generen una distribució en arbre que observa una sèrie de propietats particulars. No és però un principi nou perquè ja en Gaudí vàrem observar la presència de pilars arborescents i de nou en Otto reneix aquests interès, possiblement amb molts més mecanismes intel·lectuals per afrontar-ho. Igual que Gaudí Busca generar un pilar central que es va dividint en diferents branques a mesura que puja de manera que el resultat és un pilar de forma arborescent capaç de concentrar les càrregues perifèriques en un únic cos central. En el cas d'Otto sembla que a més va investigar la capacitat per generar recorreguts mínims, de manera que el trajecte entre diferents zones fos el més petit possible.

Però fer aquesta mena de plantejaments és una cosa i la capacitat de dur-los a terme a escala arquitectònica una altra de molt diferent. Com veurem en molts dels projectes la realització d'aquesta mena de models va suposar haver de superar tota una sèrie de reptes nous en els quals es va començar a posar de relleu que hi ha una estreta relació entre els sistemes de

computació i el disseny basat en el "form-finding"³⁴. En aquest sentit serà a partir de la seva dilatada experiència que començarà a donar-li més i més importància als sistemes digitals. Un dels primers grans experiments que va realitzar Otto fent servir aquesta mena de sistemes va ser el pavelló de l'alemanya oest de l'exposició de Montreal al 1967³⁵. El projecte es basava en la construcció d'una sèrie de mòduls que quedaven coberts per una gran membrana formada per cables d'acer pretensats de 50 cm² amb els quals suportava una superfície tèxtil de polièster coberta de PVC semi translúcid. El conjunt s'aguantava sobre 8 màstils dels quals penjaven els cables i que permetien la baixada fins al terra de les càrregues. El sistema a més estava pensat per drenar l'aigua cap a 3 punts determinats. Tota l'estructura de la coberta era, doncs, un sistema lleuger amb el què cobria una gran superfície on tenia lloc l'activitat humana en diferents plataformes i mòduls. A diferència de projectes posteriors aquí encara no tenia prou experiència en aquest sistema constructiu. Però precisament aquest projecte li va permetre guanyar-la. Per altra banda no era una construcció permanent de manera que en certa manera la tasca de càlcul i desenvolupament era més senzilla que en el cas d'una obra perpètua i va suposar l'escenari ideal per experimentar amb aquesta nova estratègia.

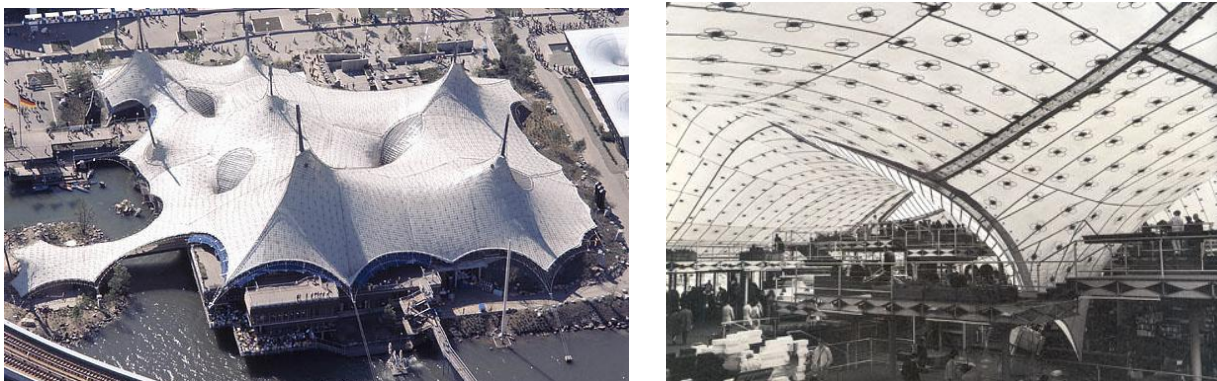


Fig 4. Fotografies del pavelló d'alemanya de l'oest a Montreal l'any 67. A la dreta visió de l'interior on es pot observar la textura de la coberta tèxtil i la seva transparència. A l'esquerra una vista aèria on es pot veure la geometria de la coberta.

Després d'aquest primer experiment Otto va guanyar una experiència molt valuosa que va posar en pràctica a l'estadi de Munic al 1972³⁶ on va tornar a fer servir un sistema similar per a cobrir grans espais amb una malla formada de cables d'acer i panells acrílics. El projecte el va realitzar Günther Behnisch en col·laboració amb diversos enginyers entre els quals hi havia Frei Otto. La

³⁴ Sistemes que posen en relació forces i forma per a la obtenció d'un model i en que totes dues característiques s'afecten mútuament.

³⁵ <http://www.tensinet.com/database/viewProject/3758>

³⁶ <http://www.tensinet.com/database/viewProject/3779>

idea era generar un seguit d'espais que quedessin protegits per diverses cobertes tèxtils que unides formessin un únic conjunt. El sistema de cobertes anava suportat per màstils i en conjunt cobriren un gran espai de 80.000 m². Un cop passats els jocs quedaria un zona de dunes d'herba que podria ser aprofitada per la gent de la ciutat per al lleure diari. Però aquest projecte presentava dificultats molt més grans que el pavelló alemany de Montreal ja que en tractar-se d'una estructura permanent calia assegurar la seva resistència a tota mena d'accions. En aquest sentit van fer falta tota mena de càlculs que es complicaren per la manca de programes informàtics adequats per a tal finalitat. Sorprenentment van generar programari propi cosa que va resultar ser completament innovadora per la seva època perquè encara no hi havia hagut experiències a gran escala en aquest àmbit. Per generar el disseny inicial encara no hi havia un programari adequat per plantejar aquesta mena de projectes des de zero així que van haver de partir de models físics reals dels quals poder extreure les formes inicials. Per a tal efecte van fer servir maquetes a escala tant a nivell dimensional com resistent per tal de simular amb el màxim realisme possible el comportament real de l'estructura. Un cop fet això entraven en acció els diferents sistemes de càlcul desenvolupats per l'equip de cara a la comprovació, verificació i confecció de les diferents peces. Durant la fase de disseny van aparèixer problemes en el plantejament de les cobertes ja que si bé a les zones properes als màstils tenien una curvatura significativa, a les parts més allunyades dels mateixos les cobertes es tornaven quasi planes. Això no era bo per l'acumulació de neu i aigua que s'hi podi formar de manera que van haver de dividir la coberta en diferents pavellons més petits que li donessin el relleu necessari que impedís l'acumulació de líquids. Per no augmentar el nombre de pilars i no condicionar l'espai per sota de la coberta es van aixecar els màstils que servien per suportar els petits sub pavellons fent-los penjar de cables que anaven units als màstils principals. Moltes d'aquestes solucions s'han fet servir més tard en molts altres projectes, però en aquest eren completament innovadores i van marcar tota una línia d'acció.

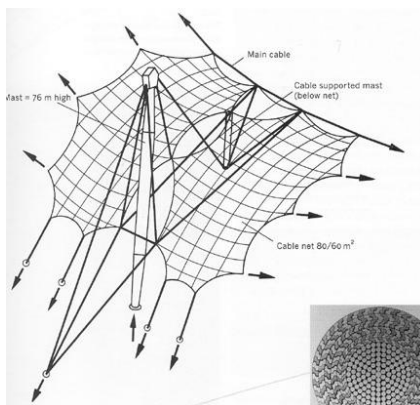
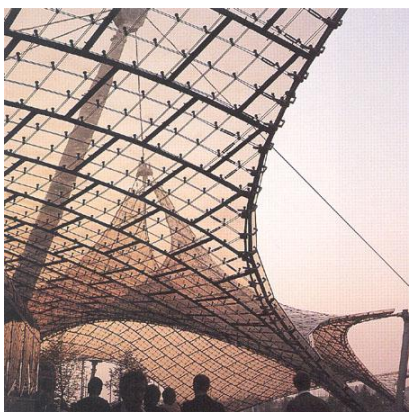


Fig 5. (esquerra) Esquema del funcionament de la malla de cables que suportava la coberta. Tal com podem veure hi havia màstils que estaven enterament aixecats del terra per mitjà d'un sistema de cables. A la dreta podem veure com era l'espai sota coberta format pels panells acrílics amb transparència.

A través de la seva experiència, Otto s'adonà ràpidament de la vital importància que poden tenir els sistemes digitals de càlcul en el camp de l'arquitectura i serà dels primers arquitectes que començarà a fer servir el modelatge digital com a eina de treball habitual. Tot i disposar de sistemes molt primitius de computació va ser pioner en l'ús d'aquesta tècnica en projectes de gran envergadura valent-se d'aplicacions dedicades a l'optimització formal i l'especejament. Els sistemes de càlcul d'elements finits es van presentar com un possible substitutiu als models físics en els quals sempre es planteja la problemàtica de com extreure i interpretar els resultats i com reproduir-los a escala mentre que els sistemes digitals no presenten cap d'aquestes problemàtiques ja que permeten treballar a qualsevol escala i amb un control total dels resultats. Tant a nivell de càlcul com de fabricació les aportacions digitals són essencials ja que estalvien nombrosos problemes d'escala, sistematització i prevenció d'errors humans. Val a dir, doncs, que Frei Otto és un dels arquitectes que ha fet un ús més innovador de la tecnologia en la seva obra, ja sigui per l'ús dels sistemes digitals o per la recerca de nous materials més lleugers que s'adaptessin millor a les exigències de les estructures tèxtils que feia servir. Però no va ser únicament la seva curiositat el que el va dur per aquest camí sinó més aviat el tipus de problema que va plantejar que així ho exigia. El fet de voler treballar amb estructures tant eficients i a la vegada tant lleugeres obligava en certa manera a portar la tècnica al límit a tots els nivells especialment quan, inspirat per l'observació de la natura, trenca amb la geometria convencional per passar a abordar una geometria basada en uns principis diferents. En aquest punt necessita una eina de càlcul molt més potent i entren en joc els sistemes de computació. Així, doncs, aquesta vinculació entre formes naturals, processos auto generatius i computació és molt estreta i tendeix naturalment a associar-se A causa de les seves propietats.

2.1.3.3 *Heinz Isler*^{37 38}

Potser no tant conegut com Frei Otto, però igualment interessant per a l'actual tesi és la figura de Heinz Isler, enginyer suís amb una forta vocació artística, que va trobar en els sistemes auto generatius una via d'expressió artística i estructuralment coherent. Buscant el que havia de ser la forma perfecta de suportar les carregues d'una volta va concloure que la manera com penjava una superfície de roba sota el seu propi pes era la resposta adequada i que només a partir de models físics es podia obtenir aquesta mena de formes. A partir d'un mètode laboriós i sistemàtic d'extrapolar les curvatures obtingudes al dibuix geomètric podria fer servir els resultats com a eina de modelatge amb el que generar el disseny inicial del projecte. La recerca de la forma més

³⁷ <http://en.structurae.de>

³⁸ http://mcis2.princeton.edu/swisslegacy/engineers_6.html

perfecta el va dur a plantejar gruixos extremadament prims a les voltes la qual cosa dóna una idea de fins a quin punt buscava la màxima eficiència en l'ús del material. Com a primer exemple d'aquesta mena d'arquitectura trobem el Wyss Garden Center³⁹, edifici format per una closca extremadament prima de formigó armat (de 7 cm) que cobreix una superfície d'uns 25 m² i 5 metres d'altura a la part central. En aquest projecte desenvoluparà mètodes i solucions que li servien més endavant. L'edifici és de base circular i es suporta sobre 4 extrems. Disposa de 4 façanes que apareixen com a talls verticals de la volta funicular i que per tant donen el perfil d'un arc funicular el qual ens marca la façana. Per impedir el pandeig de l'estructura en aquest punt (degut al poc gruix que té la closca) afegeix uns voladissos als extrems de la mateixa, aquests arrencaran perpendiculars a les vores de la superfície de manera que li donaran rigidesa. Com veiem assaja tota una sèrie de tècniques amb les quals plantejar estructures extremadament primes i eficients.



Fig 6. Wyss garden center, a Solothurn, suïssa. Aquest és el primer disseny realment lliure que Isler realitza seguint el mètode que més tard el caracteritzaria. Podem veure com els voladissos donen rigidesa a les vores de la closca en sortir-ne perpendiculars.



Fig 7. Bürgi garden center, a Camorino, suïssa. Es pot observar a les imatges una molt major esveltesa a les formes i la manca de voladissos a les vores de la façana. A baix una fotografia de l'òcul de la coberta.



39 <http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0000297>

El 1973 tornarà a rebre un encàrrec per realitzar un jardí botànic ⁴⁰, però aquest cop mostrarà molta més experiència. Aquest edifici de 27 metres de longitud presenta una closca amb un gruix de 8 cm, la qual cosa representa una proporció de 1:337 entre el gruix i la longitud a cobrir. Entre les peculiaritats d'aquesta obra trobem l'obertura d'un òcul central amb el que permetia la penetració de la llum natural a dins de la volta. A més s'estalvia la presència de voladissos en retirar lleugerament les façanes cap al interior, d'aquesta manera el problema pel guixament de la closca es redueix notablement, encara que ell mateix reconeix que en aquesta obra ha portat aquest concepte al límit. Per poder pretensar la volta va situar suports pivotants als 4 extrems per poder estirar-los cap a dins amb cables situats en diagonal, un cop formigonat el conjunt i quan ja tenia la forma definitiva va fonamentar també el 4 peus de manera que l'estructura quedés fixa. En definitiva dona la sensació de que no s'aguanta, A causa de la increïble esveltesa que presenta, però certament ha funcionat perfectament i encara resisteix. Tal com es pot veure a les imatges els models imiten cada cop més la forma d'una tela que penja a l'invers, model que va fer servir de manera quasi exclusiva a partir de 1968 com a mètode per obtenir de manera natural les formes adequades per als seus projectes.

Així, doncs, tenim un enginyer, que buscant la màxima eficiència de les formes, i al mateix temps amb una forta vocació per l'art, troba en les formes auto generades una via d'expressió. Les voltes funiculars obtingudes directament de models fets amb tela són potser la manera com ell va integrar l'expressió plàstica dins el projecte sense que això representes una pèrdua en l'eficiència del funcionament estructural. D'alguna manera deixava que l'edifici parlés per si mateix i al mateix temps això li va valer un estil particular i no impersonal tal com semblaria lògic quan fem servir formes que es generen soles. Aquesta política la va saber reduir a una frase molt senzilla amb la qual exposa aquesta idea:

"Un no genera la forma, un deixa que aquesta sigui tal com ha de ser segons la seva pròpia llei"

Amb aquesta frase, doncs, es descriu una filosofia a l'hora d'abordar el disseny en el qual l'arquitecte interactua amb les forces del model per extreure'n una forma idònia. Aquests mateixos principis són en part el que intento aplicar de manera sistemàtica en aquesta tesi i en el programari generat.

2.1.4 Conclusió

Hi ha molts arquitectes que en major o menor mesura han fet servir sistemes físics en els seus dissenys. De tots ells només hem vist amb un cert detall tres casos i sóc conscient de que n'hi ha molts més, però amb aquest estudi es suficient per demostrar que partint del comportament físic

⁴⁰ <http://en.structurae.de/structures/data/index.cfm?id=s0000298>

aplicat de diferents maneres, ja sigui en pedra, membranes tèxtils o formigó es pot generar arquitectura que sigui alhora eficient a nivell estructural i estètic i per tant unificant els dos aspectes en un únic sistema de treball.

Aquest sistema deixa actuar a les lleis de la natura amb coneixement dels seus principis i de manera convenient per obtenir la forma ideal d'una manera extremadament senzilla, els models resultants acostumen generar grans superfícies amb les quals poder cobrir polisportius o centres comercials amb una única coberta. El sistema marca, doncs, una tendència cap a la malla, o la superfície flexible, perquè és un model fàcil de controlar i d'obtenir a partir de processos dinàmics. Es genera, doncs, una convergència de sistemes que assenyalen una direcció a seguir. Però la malla no és l'únic element que trobem a l'arquitectura i aquesta limitació ha reduït els sistemes autogeneratius basats en aquests principi a un cas massa particular d'arquitectura cosa que n'ha impedit la seva major extensió. Cal poder controlar molts més elements si volem generar un mètode més funcional i extensiu que vagi més enllà de la malla. En aquest sentit ja veiem de l'estudi sobre sistemes de branques de Otto, o les columnes arborescents de Gaudí marquen de nou una possible ramificació dels sistemes de "form-finding" en els quals podríem trobar noves expressions generatives que superin la superfície. En aquest sentit les eines digitals són fonamentals perquè faciliten aquesta vinculació entre forma i força. Això queda reflectit tant en el cas de Frei Otto, que ja va començar a fer servir la informàtica, com en els últims estudis sobre Gaudí ⁴¹ on s'apunta ja amb molta més força aquesta tendència. Per això un sistema obert de simulació física en el qual puguem provar tota mena de models que incloguin o superin la malla i englobin un conjunt més extens de morfologies arquitectòniques es fa necessari. Si això fos possible es podria plantejar la idea de fer els sistemes autogeneratius extensibles a casos arquitectònics que fins ara no havíem gosat plantejar.

Respecte a les experiències d'arquitectes anteriors hi ha un canvi molt notable que diferencia la seva situació de la nostra i és l'augment en l'ús dels sistemes digitals en tots els àmbits de la societat. Com hem vist la informàtica ha jugat un paper secundari o nul a l'hora de treballar amb sistemes físics en els quals sempre s'acabava fent un model físic per decidir la morfologia. Ara però això no serà així ja que comença a ser molt més rendible i eficient fer servir models digitals que no pas maquetes físiques tal com s'ha fet fins ara. Això vol que l'eina de treball ha canviat substancialment i cal estudiar-la per poder comprendre el seu funcionament i establir correctament el paper que pot jugar en l'àmbit arquitectònic.

⁴¹ Serrallonga, J., *Geometria i mecànica en els models de Gaudí* 2003 ETSAV, Dept. Estructures a l'arquitectura, Sant Cugat del Vallès. **PAG 385**

2.2 Exemples de programari arquitectònic basat en mecanismes físics

Com veiem l'eina informàtica ofereix un major control de les condicions en les quals té lloc la simulació i els resultats poden ser extrets amb molta facilitat i precisió mentre que l'esforç i el temps necessaris per obtenir-los disminueix considerablement. Això permet al tècnic fer propostes més arriscades sense perdre'n el control i per tant accedir a dissenys més ambiciosos. Un exemple clar el trobem en el càlcul d'estructures, que normalment es basa en models d'elements finits per reproduir el comportament de superfícies i barres quan es veuen sotmesos a accions externes. Gràcies a això ara es poden plantejar amb relativa facilitat estructures impensables fa només uns anys. Però molts dels sistemes que fem servir en arquitectura provenen de l'enginyeria i no tenen en compte alguns aspectes clau del procés de disseny arquitectònic. Aquests programaris acostumen a partir de la base que el model ja està completament definit des del primer moment i que faràs servir elements estandarditzats de fabricació, però no tenen en compte el fet de que l'usuari pot estar definint el model mentre el modela i que pot requerir de peces que no estan estandarditzades o que són amorfes. En aquests casos els sistemes perden molts dels seus avantatges i el procés de prova i error es torna quasi inviable. Això és completament contradictori amb l'estratègia de l'arquitecte, especialment a les fases inicials, quan necessita poder modificar amb extremada facilitat el model. A més no es necessiten models precisos en aquesta fase inicial sinó més aviat el contrari, treballar amb conceptes. Si únicament posen èmfasi en la comprovació tècnica del resultat que s'ha obtingut i no vigilen que el procés de treball sigui àgil, senzill i expressiu és evident que no podrem donar el millor dels resultats. Així, doncs, l'arquitecte parteix d'una aparent contradicció inicial en necessitar dades concretes d'objectes que no estan definits precisament per poder-los definir. Aquest problema és molt més complex del que sembla però no és impossible ja que cal entendre que el procés d'aproximació, la manera com es va definint el model, és el que pot donar la clau de la resposta. Si establíssim una vinculació entre el procés de modelatge i el càlcul tècnic, podríem anar calculant allò que hem definit en temps real, encara que fos un element abstracte. Falta, doncs, establir aquesta relació de manera que no continuïn sent processos separats sinó que formin part d'un únic procés integral que permeti el disseny adequat i la comprovació tècnica de la proposta. Per plantejar una possible solució podem començar per observar com s'ha afrontat aquest problema des d'altres àmbits com per exemple l'enginyeria. En aquest cas s'ha superat la problemàtica amb l'ús dels sistemes paramètrics de modelatge que permeten controlar diferents aspectes formals del model a partir de xifres que l'usuari pot modificar. A més mantenen un control de processos molt elaborat que permet generar tota la peça com el fruit d'un procés que es pot modificar en qualsevol punt. Però en arquitectura aquesta aproximació té tota una sèrie de problemes que abans ja hem mencionat a la introducció

i que la invaliden en certs aspectes clau del procés de disseny deixant el problema sense solució. El plantejament que alguns arquitectes estan proposant per superar aquest problema dista notòriament dels sistemes rígids paramètrics que s'apliquen en el món de l'enginyeria i es basen en recuperar la idea de les formes auto generades amb algorismes de recerca en els quals l'ús de l'eina digital té molta menys càrrega tècnica i en canvi molta més versatilitat formal de manera que es treu tecnicisme en favor del control i la riquesa de la forma. Aquest camí sembla indicar que més tard es podrà recuperar aquest tecnicisme però com a part d'un processat posterior sobre el resultat obtingut i no com una finalitat del sistema de modelatge. En aquest sentit estan apareixent en el mercat plantejaments basats en l'ús de sistemes de simulació física dedicats a optimitzar formes o a obtenir estructures amb curvatures complexes que tinguin propietats geomètriques específiques. Aquestes aproximacions sí que estan trobant un major acceptació en el món del disseny tot i que encara no tenen un ús clar en arquitectura o bé el seu ús està reduït a casos molt particulars.

2.2.1 Kangaroo

El programa més potent que hem trobat dedicat a la inclusió de fenòmens físics en el procés de modelatge és un mòdul del programa "Rhinoceros". El seu autor, Daniel Piker, està orientant la seva recerca a la generació i optimització de formes amb certa complexitat geomètrica a partir de simulacions de fenòmens físics naturals en temps real. Al gener del 2010 Piker presenta un sistema que permet, a partir del mòdul "Grasshopper", simular fenòmens dinàmics sobre la base del programa de modelatge Rhino. Amb la idea seguir el camí marcat per arquitectes com Otto o Gaudí, ell presenta el seu programa com un sistema de generar malles funiculars i per fer-ho es basa en mètodes de càlcul capaços d'optimitzar el model per aconseguir propietats geomètriques concretes com per exemple que siguin superfícies mínimes o fer que les tensions es distribueixin de manera uniforme per una estructura. Per aconseguir-ho es basa en un mètode de simulació basat en un sistema de partícules i cordes que les enllacen⁴². El motor físic està basat en les lleis de Newton, les quals ofereixen una aproximació conceptualment molt còmode i versàtil amb una programació extremadament senzilla. Aquest mètode permet abraçar una gran varietat de casos amb un únic sistema de simulació de manera que ofereix moltes garanties per mantenir-se estable quan es donin situacions imprevisibles. Per altra banda el fet de fer servir un únic motor de treball que sigui molt estable i pugui interactuar en temps real és un objectiu perseguit tant pels sistemes de modelatge com per la indústria dels jocs d'ordinador perquè comparteixen la finalitat comú de relacionar-se intensament amb l'usuari en temps real.

⁴² <http://spacesymmetrystructure.wordpress.com/>

Possiblement sigui a arrel d'aquest fet que la física Newtoniana torni a estar de moda en tots dos àmbits ja que és senzilla i estable, generant un comportament molt natural a la vista.

Una de les idees que Piker exposa i que considero essencial és la capacitat de simular comportament físics que no són reals però que poden ser igualment intuïtius i útils de cara al treball professional. Ell els anomena comportaments pseudofísics i és caracteritzen per la capacitat de dotar als materials d'una certa intel·ligència que els faci comportar-se de manera coherent amb algun criteri o regla. Aquesta mena de comportament pot facilitar molt la feina a l'usuari ja que es pot delegar en el material l'acompliment de certes propietats geomètriques del model de manera tingui més llibertat de moviments i menys feina. S'exposa també la voluntat de reproduir el que fins ara eren maquetes físiques sobre una base digital de manera que es pugui treballar sobre elles amb tots els avantatges dels sistemes informàtics.

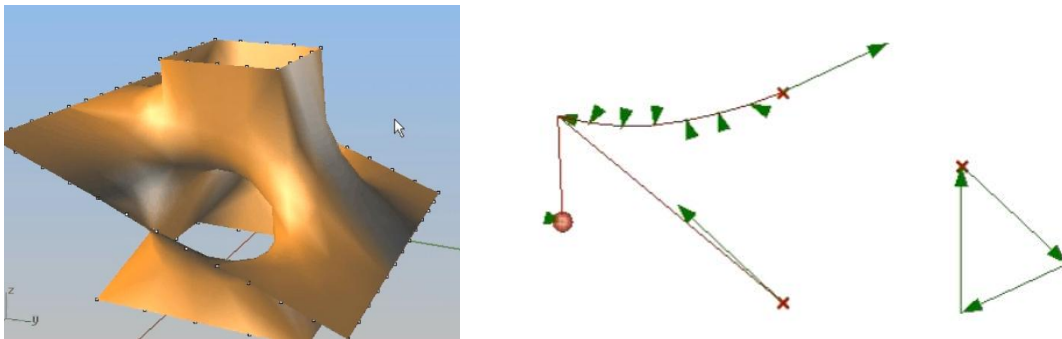


Fig 8. A l'esquerra exemple de tractament de la geometria amb el mòdul kangaroo aplicat a superfícies mínimes. A la dreta visualització del sistema de vectors de força.

Actualment ja s'han presentat algunes demostracions de les simulacions que el programa serà capaç de fer un cop acabat. A partir dels principis de funcionament abans esmentats s'ha plantejat la construcció d'estructures funiculars, estructures de barres articulades, col·lisions entre sòlids o estudis amb superfícies mínimes⁴³. Però una de les possibilitats més interessants del sistema es basa en la possibilitat de treballar sobre NURBS (veure capítol 3.2.6 i 3.2.7) cosa que permet aprofitar-ne la versatilitat geomètrica i combinar-la amb la capacitat d'optimització. Aquests es combinen amb punts de control del programa per aproximar un possible resultat de manera iterativa i visual permetent així que l'usuari pugui seguir (que no controlar) el procés en tot moment. Ja en els vídeos de demostració es veu la potència del sistema a l'hora de resoldre problemes geomètrics complexos i reorganitzar l'estructura en base a aquests però encara no està acabat i per tant es fa difícil dir quin rendiment real tindrà com a eina de disseny. El dubte segueix estant en la capacitat de control de l'usuari sobre el procés de simulació físic. En la fase

⁴³ <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blog/list?user=1rbtle63jztr0>

actual estan apareixent moltes propostes, que en aquesta tesi també han sorgit, de quins possibles usos podem donar als sistemes dinàmics, un exemple clar seria la panel·lització de superfícies i especialment la capacitat per retenir la planicitat dels panells en superfícies on el vèrtex es moguin lliurement. Aquest aspecte és essencial de cara a resoldre problemes geomètrics complexos d'una manera senzilla i versàtil i poder aplicar amb total llibertat tota mena de panells al camp del disseny. També observem, tant en aquest mòdul com en la present tesis, que apareixen una gran profusió de casos diferents en els quals s'exploren possibles vies de treball a partir de les quals intentar extreure'n una utilitat. De les diferents provatures que s'exposen amb el mòdul Kangaroo n'hi ha algunes que val la pena esmentar per tal de fer-se una idea de la manera com es plantegen els problemes amb sistemes de simulació física. Un cas significatiu el trobem en una demostració en la qual es pretén trobar panells hexagonals plans en una superfície corba irregular. Aquesta aplicació intenta seguir la curvatura d'una superfície NURBS (veure capítol 3.2.7) a partir de panells plans que tenen la condició de mantenir tots els seus angles a 120° ⁴⁴. Com passa en molts casos de sistemes dinàmics les diferents forces poden entrar en contradicció entre elles fent que la planicitat no estigui assegurada en tots els casos. Això ho podem observar si mirem els panells que queden il·luminats en els quals distingirem com els diferents triangles que els componen presenten diferents reflexions. Això és indicació de que no tots els triangles tenen exactament la mateixa inclinació ja que reflecteixen la llum de manera diferent i per tant podem deduir que la superfície no és completament plana. Aquí apareix un tema que és important a tenir en compte quan treballem amb sistemes dinàmics i és que les condicions no es poden assegurar sempre al 100% sinó que s'aproximen el més possible i tot i que poden donar un resultat molt precís aquest no és el fruit d'un sistema exacte com seria una fórmula directa sinó d'una aproximació iterativa.

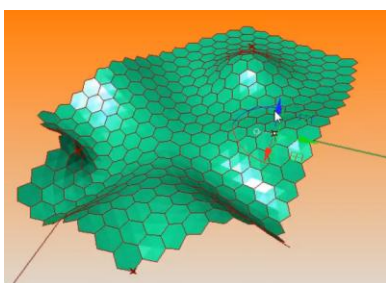


Fig 9. Exemple de malla hexagonal de panells plans fets amb Kangaroo en el qual podem observar com s'han adaptat els panells a la geometria de la NURBS amb una forma regular.

Un altre cas similar el trobem en un procés per cobrir una superfície a base de panells quadrats plans que segueixen una curvatura determinada. En aquest cas el model parteix d'unes formes cúbiques que s'aniran transformant segons la morfologia dels panells, intentant en tots els casos mantenir la forma quadrada dels mateixos. Val la pena esmentar també que en la demostració apareixen el que serien punts de control a partir dels quals controlar la forma de l'objecte. Aquest

⁴⁴ <http://spacesymmetrystructure.wordpress.com/>

mateix concepte ha aparegut en la present tesis i per tant sembla ser un element essencial de cara al control d'elements dinàmics.

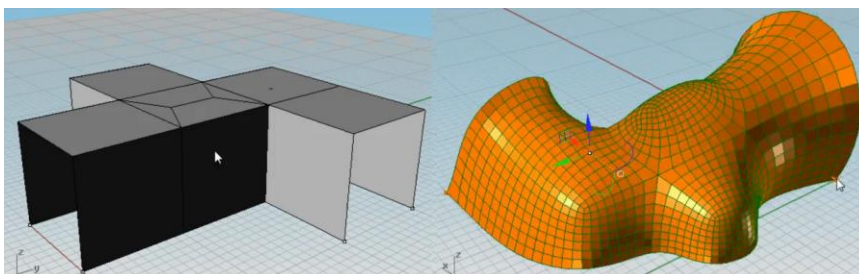


Fig 10. Exemple de transformació d'un element cúbic en una malla de panells quadrats a partir de sistemes pseudo-físics de transformació.

És interessant fer notar també que tot i començar amb una gran varietat de casos sembla que la recerca s'està centrant cada cop més en les malles. Es podria deduir, doncs, que els sistemes dinàmics tenen una afinitat natural amb les malles i això segurament té a veure amb la versatilitat que presenten aquesta mena d'estructures. En ser un element genèric que pot transformar-se fàcilment en una gran varietat de coses es deixa modificar i modelar sense grans complicacions. Aquesta condició d'adaptabilitat és imprescindible per un sistema dinàmic que no té una forma fixada i que es troba sotmès a un continu procés de transformació. Així, doncs, calen estructures transformables i per tant potencialment riques de cara a la utilització de sistemes dinàmics i no elements rígids com hem fet servir fins ara. A més de la malla calen altres estructures que ens permetin englobar en el sistema una major varietat de casos arquitectònics, ja que com més estructures bàsiques puguem introduir, més pràctic i àgil serà el sistema.

Caldrà, doncs, estar atent al desenvolupament d'aquest mòdul per avaluar quines capacitats i mancances presenten els sistemes dinàmics de treball en el camp de l'arquitectura. En qualsevol cas aquest programa i alguns altres que s'han fet recentment demostren que encara hi ha un interès pels sistemes dinàmics i que en certa manera no deixa d'estar present, encara que sigui en segon pla.

2.2.2 CADenary Tools

Similar al cas de "Kangaroo" però molt més restringit a la simulació d'arcs i voltes funiculars trobem "CADenary Tools". Davant la problemàtica que suposa el plantejament de sistemes tènils en arquitectura l'autor planteja la fabricació virtual de models elàstics amb els quals reproduir el procés de relaxació dinàmica i generació de voltes funiculars per mitjans digitals. Es tracta d'Axel Killian que ha donat lloc a un programa autònom capaç de reproduir el comportament de cordes i malles flexibles sotmeses a la força de la gravetat. Aquest ha estat un dels primers usos que ha tingut el concepte de cable funicular en arquitectura ara reproduït en un

model virtual que en simula el comportament amb molta precisió. A la introducció de l'article d'axel killian⁴⁵, l'autor manifesta que:

'Many designers have experimented with hanging chain models and other physical methods [...] Heinz Isler has promoted the use of physical models as the most appropriate method to discover three dimensional forms. Similarly, Frei Otto and his colleagues in Stuttgart have developed highly accurate physical experiments for finding structural form. In the early 20th century, Antoni Gaudi employed hanging models in the formfinding processes [...]' ⁴⁶

En aquest text demostra clarament la utilitat que fins llavors havien tingut els models físics en el procés de disseny i que ara podria reproduir virtualment per mitja d'un programa de modelatge al qual se li apliquen algunes lleis físiques senzilles. Així, doncs, intenta lligar el programa com un desenvolupament propi d'una tradició arquitectònica amb molts anys d'història i nombrosos èxits. Aquest plantejament però té un àmbit d'aplicació molt reduït perquè està dedicat únicament a una estratègia arquitectònica concreta i per tant no sembla aspirar a tenir un ús general en arquitectura, tot i això el programa obtingut no és gens menyspreable perquè la seva capacitat de simulació supera àmpliament el que qualsevol maqueta física pot oferir tant a nivell de precisió com de facilitat.

El mètode de simulació físic de nou està basat en els principis de la mecànica de Newton i ja és significatiu que per segon cop trobem aquesta mena d'aproximació en un sistema resolució dinàmic. Com en el cas anterior de Kangaroo es basa en un sistema de partícules i cordes en el qual a les partícules se'ls assigna una massa i un vector d'acceleració i de velocitat, i als cables se'ls dona una longitud inicial assignada, una resistència i un factor de fricció. Amb aquests dos elements es construeix un simulador senzill capaç de generar tota mena de corbes catenàries a partir de la reproducció del comportament d'un cable real. Matemàticament aplica un sistema implícit per resoldre les equacions diferencials basat en l'aproximació d'Euler i Runge Kutta⁴⁷.

45 Kilian, A., Ochsendorf, J., , "Particle-spring systems for structural form finding", 2005, *Journal of the international association for shell and spatial structures* (J. IASS), Vol. 46 No. 2 August n. 148, P. 77-84

46 " Molts dissenyadors han experimentat amb cordes penjants i amb models físics [...] Heinz Isler ha promogut l'ús de models físics com el mètode més apropiat per descobrir les formes tridimensionals. En la mateixa línia, Frei Otto i els seus col·legues a Stuttgart han desenvolupat models físics molt acurats per generar formes dissenys estructurals. Al principi del segle 20, Antoni Gaudí va fer servir models penjants en el procés de generació formal [...]"

47 Kilian, "A. Linking Digital hanging chain models to fabrication: Examining the digital practice of architecture", 2004, a *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* and the 2004 *Conference of the AIA Technology in Architectural Practice Knowledge Community*. pp. 110-125 **4.2 The computational model used for simulating hanging models**

Tot i que l'autor ja reconeix que els sistema de partícules i cordes no és una cosa nova en informàtica, si que considera innovador el que s'apliqui com un sistema de disseny i recerca formal en arquitectura. A més permet una comprensió directa del comportament del model en un "feedback" continu. Un cop que l'usuari ha introduït les dades inicials sobre una malla base el cable comença a despenjar-se i només queda fixat pels seus extrems. En el procés que li segueix es mostra amb tota claredat la deformació que pateixen les cordes i com poc a poc es va generant la corba de manera iterativa fins assolir l'estat d'equilibri final. El sistema genera elements extremadament elàstics i cal una certa experiència en fer-lo servir amb prou propietat com per d'extreure'n models funcionals aplicables a un disseny. Ja s'indica, doncs, que els requeriment dels sistemes dinàmics són en realitat molt diferents als que teníem en el cas dels sistemes CAD convencionals i que per tant cal plantejar una aproximació nova amb tot l'esforç que això implica. Possiblement com a fruit d'aquesta problemàtica el mateix autor reconeix que el sistema no disposa d'una gran varietat de controls i que " [...] The current implementation is still limited and currently requires programming for reconfiguration [...]" ⁴⁸ de tal manera que si no és a través de la programació directa hi ha certs aspectes del comportament dinàmic que no saben com fer-los accessibles al públic en general. Aquest aspecte, molt lluny de ser un simple detall sense importància, és un element vital de les eines digitals i especialment en el cas de l'arquitecte que necessita control i agilitat en les diferents fases de projecte. La manera com es presenten les eines de control dels sistemes dinàmics és actualment la barrera més important que han de superar aquests sistemes a l'hora d'establir-se com una eina d'ús general.

De la mateixa manera que pot simular un arc també pot combinar diversos arcs per construir malles que es comportaran de manera molt similar però combinant les accions de diversos cables al mateix temps. Fet això el programa es mostra capaç de donar diferents gruixos de secció al material segons l'estat tensional del mateix. Anuncia en tot això una idea que considero important i és que comenta que ja Isler deia que: "[...] In order to achieve uniformly distributed loads in a structure the thickness has to be adapted in accordance to the loads present after the initial form finding [...]" ⁴⁹ Això és essencial de cara a transformar correctament els models obtinguts en un sistema digital en peces real que es comportin segons els criteris previstos. En aquest sentit el programa necessita incloure d'alguna manera un anàlisi de les tensions que es tradueixi en un augment de gruix de les seccions.

⁴⁸ "L'aplicació actual es limitada i de moment requereix de programació per configurar-se"

⁴⁹ "Perquè les càrregues es reparteixin uniformement per l'estructura cal que el gruix s'adapti a l'estat de càrregues obtingut després del primer càlcul [...]"

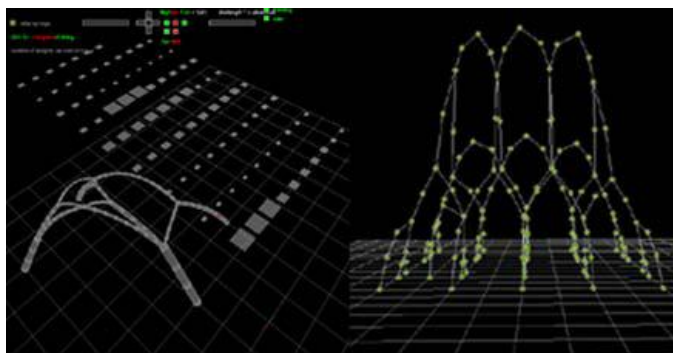


Fig 11. Imatge del programa CADenary tools desenvolupat sobretot gràcies als estudis d'Axel Killian. Com podem veure a la imatge de l'esquerra, el sistema pot donar gruix a les barres segons l'estat tensional.

Però fins a quin punt podem substituir una maqueta amb aquests sistemes? Cal tenir en compte que el pas dels sistemes físics als sistemes digitals es menja molts aspectes als quals no donem prou importància i que automatitzem grollerament sense prestar prou atenció als detalls que donen sentit a un disseny. En aquest sentit es pronuncia l'autor dient " Despite the challenges they pose in achieving accuracy and scaling of material and mass, physical models do ensure a more holistic simulation of the problem than an image based computer simulation ". A més de les possibles limitacions i simplificacions que pot presentar un sistema digital hi ha una pèrdua de control del model digital si es compara amb un model material ja en els sistemes digitals només pot controlar allò que el programador ha deixat en mans de l'usuari i a més, massa cops, no entenem per quines lleis està regit el procés que li segueix. Cal tenir una mirada atenta per entendre que la transposició literal d'un procés físic no reproduïx de manera fidedigna tota l'etapa prèvia de reflexió i dedicació que requeria la fabricació d'una maqueta física i que moltes vegades tenia més importància que la maqueta en si. En aquest sentit val a dir que la laboriositat i el control de la maqueta física aquí no hi són presents. Per tot això aquest autor ens fa pensar en la veracitat que poden tenir les simulacions digitals de fenòmens físics a l'hora d'extrapolar-ne dades per aplicar-les a projectes reals. Cal ser molt curós en aquest aspecte ja que el comportaments dels materials pot ser molt més complex del que s'ha plantejat. Per altra banda és cert que Daniel Piker en el mòdul Kangaroo admet que l'ús de simulacions pseudofísiques poden ser útils, però el problema no està en el fet de que la simulació sigui més o menys fidedigna a les propietats reals del material, sinó en que el mecanisme de simulació no tingui desviacions més subtils respecte al comportament real dels cossos que la invalidin en parcialment.

2.2.3 Programes de force-density

Amb una aproximació diferent al procés d'optimització de la forma trobem el que serien els sistemes de "force-density", o mecanismes pels quals s'estableix una relació directa entre la distància i la tensió. Tot i les nombroses similituds entre els sistemes dinàmics i els sistemes de force-density hi han algunes diferències significatives que hem observat pel que fa a la formulació de les fórmules ja que estalvien el concepte de velocitat i acceleració per descriure el moviment dels vèrtex i simplement tenen en compte la longitud de les rectes que hi conflueixen. A partir d'aquí el sistema de càlcul tant pot estar basat en un mètode iteratiu com en un sistema soluble de matrius segons la densitat de la malla a avaluar. Aquests programaris es podrien considerar com un pas previ als sistemes pròpiament dinàmics i es podrien considerar semi-dinàmics ja que normalment no estan plantejats per visualitzar el procés de relaxació dinàmica o admetre la intervenció de l'usuari especialment quan apliquem càlcul matricial però gràcies a la seva formulació fer això és quasi immediat ja que la seva traducció a sistemes iteratius és immediata. Per altra banda, com que no es tenen en compte alguns criteris fonamentals de la física com seria el concepte de velocitat o d'acceleració, estalvien part dels càlculs i de la memòria que normalment necessitem per al processat de malles amb sistemes de partícules i això vol dir que aquests mecanismes es poden tractar amb més eficiència que les simulacions físiques. Tot i això són sistemes que no reproduïxen un comportament completament real dels objectes en ometre certs conceptes clau com la velocitat o l'acceleració i per tant es tractaria d'un sistema purament dedicat a l'optimització geomètrica sense possibilitat de simular fenòmens naturals complexos.

2.2.3.1 Programari

Entre els diferents programes que fan servir aquesta aproximació trobem per exemple el Formfinder desenvolupat per TECHNET GMBH⁵⁰, o el Wintess⁵¹ desenvolupat per Ramón Sastre. Aquests programaris basen el seu èxit en donar resposta a un mercat poc nombrós però significatiu d'arquitectes i empreses d'estructures que es dediquen a la fabricació de superfícies tèxtils i cobertes lleugeres. En aquest sentit són eines molt concretes per a un camp específic de l'arquitectura al qual poden donar una resposta completa. A partir d'una malla en dues dimensions a la qual se li donen unes condicions de contorn i de tensió el programa fa servir un sistema de "force-density" per aproximar la posició dels punts a l'espai i optimitzar la seva

⁵⁰ <http://www.formfinder.at/main/downloads/tutorials/>

⁵¹ <http://tecnologia.upc.es/wintess/manual/>

disposició general. Aquest mecanisme no fa servir les lleis de newton sinó una relació entre la longitud dels segments que van a parar a un vèrtex de manera que el procés de convergència a un resultat és molt ràpid. A aquestes longituds se'ls assigna una tensió equivalent segons alguna mena de criteri i es deixa que l'estructura es reguli automàticament equilibrant totes les tensions. En poder operar tant de manera iterativa com de manera directa el sistema es pot beneficiar-se de totes dues estratègies per igual. Mentre que per malles de molta densitat és molt més eficient un sistema iteratiu que un de directe, perquè té una formulació més senzilla i en créixer exponencialment la necessitat de càlcul amb la complexitat una formulació senzilla ofereix avantatges evidents, per sistemes més senzills i de menor densitat el sistema directe és molt més ràpid. Tant pel mètode emprat com pel mateix disseny aquesta mena de programes no pretenen ser una eina d'ús general en arquitectura sinó un instrument específic dedicat a resoldre un problema de disseny concret en el camp del càlcul estructural i de la construcció. Aquesta claredat en l'ús de l'eina ens indica una possibilitat en la qual poden participar els sistemes dinàmics en el procés de modelatge habitual i és jugant un paper auxiliar i no principal per resoldre certs problemes concrets per als quals els mecanismes dinàmics tenen avantatges molt evidents i deixant el gruix del modelatge als processos convencionals de CAD. Aquesta és una possibilitat d'ús molt real que no s'ha de deixar de banda perquè de moment ha estat la única via que sembla tenir una certa sortida.

En comprovar el funcionament dels programes que fan servir aquesta estratègia hem pogut observar que el sistema de force-density està tractat com una funció estàtica més. Com que el control dels elements es fa a partir de vèrtex, i els elements dinàmics s'adapten de manera instantània, dona la impressió que són una funció com el paral·lelisme o la intersecció. En realitat només aprofiten l'amplia capacitat d'adaptació d'aquests mecanismes per resoldre un problema geomètric concret reduint el camp d'acció per tal de no generar confusió. Aquesta aproximació és molt més realista i menys especulativa que la del present estudi i ara mateix és difícil dir si els sistemes dinàmics tenen més sortida per aquest camí que pel que plantejo a la tesis. Derivat d'aquest plantejament estàtic de l'eina dinàmica neix una diferència fonamental amb altres sistemes com "Kangaroo" o "CADenary tools" ja que el moviment no és observable, els canvis tenen lloc de manera quasi instantània i per tant interna. En aquest punt el sistema vol comportar-se més com una eina de CAD per no perdre el control del model, però al mateix temps tampoc aprofita la possibilitat d'establir una comunicació directa amb l'usuari de manera que aquest pugui "veure" el que està computant el programa. La visualització d'aquest procés permet que el càlcul ja no sigui quelcom misteriós que té lloc a l'interior de la CPU sinó que és torna un procés comunicable que es pot observar i entendre perfectament des de fora.

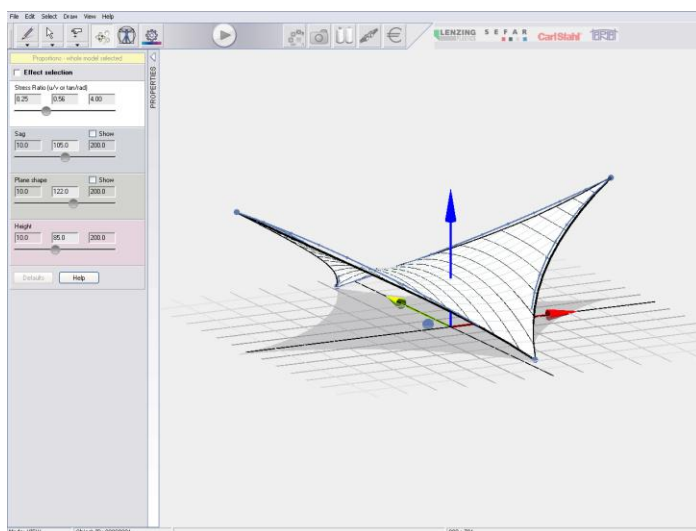


Fig 12. Captura de pantalla del programa FormFinder en la qual podem veure com s'ha generat una malla senzilla i la disposició general del programa.

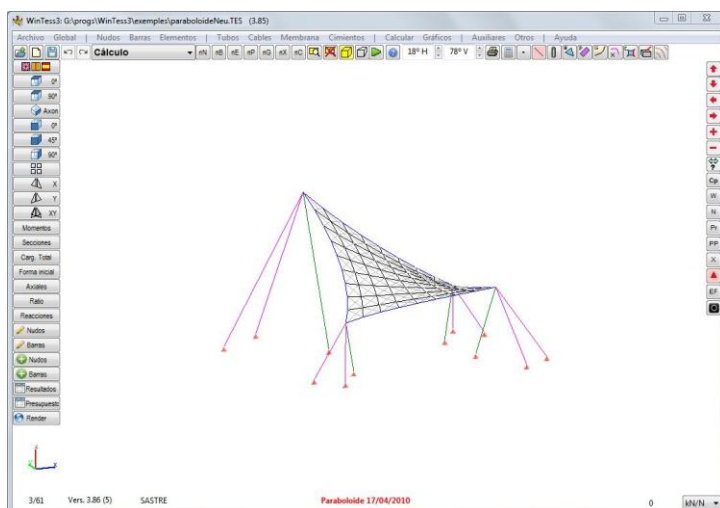


Fig 13. Captura de pantalla del programa Wintess en el qual s'està tractant una superfície en forma de paraboloide.

Tot i això si que hi ha una sèrie de temàtiques comunes que es repeteixen en ambdues aproximacions i que val la pena recalcar com per exemple que el sistema dinàmic en tots els casos actua preferentment sobre una malla, cosa que també vam observar en els casos anteriors com "Kangaroo" o "CADenary Tools". En aquesta mateixa línia veiem que es planteja molt clarament el control de les condicions de contorn, les quals cal definir prèviament a la generació de la malla. És interessant fer notar que aquests mateixos problemes s'han presentat en el desenvolupament de l'eina desenvolupada per aquesta tesi i certament no només han aparegut paral·lelament el concepte de punt de control sinó que també el problema del control de vores s'ha hagut de tractar amb molta cura. Per tant veiem que aquesta aproximació és un mecanisme molt més directe que guarda certs punts en comú amb les simulacions físiques, però

que intenta disminuir al màxim les iteracions per tal de convergir a la màxima velocitat possible cap a una solució.

En el cas de WinTess el sistema presenta una varietat d'aspectes que li permeten donar un tractament molt complet per el disseny, tractament i càlcul de superfícies tèxtils. En primer lloc el sistema de disseny es fa a partir del sistema de simulació del programa d'aquesta manera es genera una malla i es modifica amb el sistema de "force-density". En l'ajuda del programa es presenten diversos mètodes a partir dels quals es pot crear una superfície mínima ja sigui per geometria o fent servir bombolles de sabó i s'especifica que el programa fa servir la simulació. Per altra banda el programa permet escollir entre càlcul per sistema de barres o per elements finits, cosa que permet aplicar dues casuístiques bàsiques de l'anàlisi estructural segons el cas. A més d'això el sistema permet operar de manera iterativa o per fórmula cosa que permet adaptar els algorismes segons el tipus de malla per tal d'obtenir un major rendiment de càlcul. D'aquesta manera s'ofereixen diverses modalitats de treball, ja sigui per realitzar un procés de "form-finding", per calcular els elements de l'estructura o bé per separar l'objecte en peces d'una certa geometria. En aquest sentit el sistema s'obre per tal de donar cabuda a la major utilitat possible dins de l'àmbit de les estructures tènils i així adaptar-se a un major nombre de casos. Entre el tipus d'objectes que trobem en el programa apareix el nus, la barra, l'element, i els auxiliars, a partir dels quals es defineixen tubs, cables, patrons de tall, geodèsiques, etc. El que podem observar és que la mena d'objectes que fa servir són molt similars als plantejats per la tesi, però manté importants diferències que havíem vist al principi ja que no és posa l'èmfasi en el dinamisme sinó que es fa servir com una eina més dins el programa, fent que les animacions no siguin un pas imprescindible per assolir un resultat sinó una possibilitat del mateix. En aquest sentit manté un plantejament d'eina CAD estàtica en la qual els sistemes dinàmics s'entenen com una funció de comprovació i obtenció de resultats puntuals.

2.2.4 Altres aportacions

Hem pogut trobar un article que ja apunta a la possibilitat de fer servir un sistema de simulació física com a eina principal de modelatge. Concretament publicat per un equip de recerca d'Autodesk, que és precisament una de les principals marques de programari CAD que trobem actualment en el mercat, per primer cop es presenta un projecte que aborda l'ús sistemàtic de les simulacions físiques com un mecanisme de disseny formal capaç de solucionar problemes geomètrics generals. Aquest plantejament és radicalment diferent a propostes anteriors que feien servir la física de manera puntual, ara això canvia i de la mateixa manera que en la present tesi els sistemes de simulació física estan entesos com un motor unificat i global per solucionar qualsevol problema que pugui ser formulat en forma de camps de força. Es plantegen a més

generar tota mena de dissenys a partir d'aquests mecanismes superant la malla com a element únic de treball i ampliant així l'espectre de casos als quals podem aplicar els sistemes dinàmics amb èxit. Tot i això encara es tracta de plantejaments primerencs i que necessiten d'un major desenvolupament i maduració per donar lloc a eines plenament funcionals. El que sí és molt important és que ja apareixen mencionats en aquest article diversos conceptes que considero essencials de cara a la comprensió de la lògica que segueixen els processos de modelatge basats en simulacions dinàmiques. En primer lloc es planteja la lògica interna del model com un atribut inherent a l'aplicació de sistemes dinàmics de simulació. Aquest principi fa que un element es modifiqui seguint una lògica que pot ser constructiva, artística, estructural o qualsevol altre segons la manera com ha estat modelat. Com podem llegir en el següent fragment de l'article:

"Instead of approaching POQ meshes as an optimization problem, we embed their rationale within a flexible and iterative design process. Therefore, a freeform surface is defined as an emergent set of relationships among simpler components." ⁵²

Per tant no es vol plantejar el problema com un tema d'optimització sinó de lògica interna del mateix model de forma similar a com fan els sistemes de BIM actuals. Aquesta lògica interna es vol construir a partir de les forces que actuen sobre aquest de manera que certes situacions no desitjades no puguin tenir lloc. Com ja passava amb Gaudí, no s'entén que el procés de càlcul i d'optimització sigui un post processat o una comprovació sinó part intrínseca del mateix sistema de disseny fent que ja d'entrada tot el model estigui en harmonia amb aquests principis constructius o estructurals. El concepte de relaxació dinàmica també apareix mencionat en aquest article com un sistema general d'optimització que pot ser aplicat a tota mena de casos. Aquest segueix el procés natural d'equilibri de les carregues en el qual un sistema tendeix a minimitzar l'energia potencial i a buscar una situació d'equilibri el més estable possible. Aquest principi s'aplica tant a l'obtenció de superfícies mínimes com a la generació de voltes de catenària. Tots aquests processos a més es poden combinar entre ells perquè fan servir un únic motor de càlcul. Aquest fet permet que qualsevol fenomen pugui ser combinat amb qualsevol

52 "En comptes d'aproximar la planicitat de les malles de quadrilàters com un problema d'optimització, inserim un comportament adequat en un sistema iteratiu i flexible de disseny. D'aquesta manera una forma lliure emergeix com a fruit de la relació d'elements senzills"

Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmed, D., Tessier, A., Glueck, M., Khan, A., " Physics based generative design", 2009, Publisher: *Les presses de l'université de montréal*, CAAD Futures 2009 Pages: 231-244 **4.2. Embedding Fabrication Logic**

altre per donar lloc a un comportament complex que combina les propietats de l'un i de l'altre⁵³. Val a dir que aquest procés és essencial de cara a poder obtenir lògiques internes el més flexibles i variades possible que permetin resoldre tota mena de problemes geomètrics de manera eficaç.

Aquest article, doncs, planteja molts elements clau i marca una línia de recerca sobre els mecanismes de simulació física orientat a fer-los servir com a motor general de disseny de manera que en confirma la direcció tot i que segueix sense oferir encara una solució clara als majors problemes que planteja aquest repte. Tot i no ser l'únic article que parla de la temàtica dinàmica com a eina de disseny és un dels primers articles (si no el primer) que la institueix com a possible eina d'ús general en el camp del modelatge, cosa que ja ens dóna una idea de per on pot desenvolupar-se aquest tema. Per altra banda en presenta quins són els aspectes principals d'aquest sistema i com poden ajudar al disseny i modelatge en arquitectura i altres camps i en aquest sentit és extremadament innovador.

2.2.5 Conclusions

Amb els mètodes actuals de simulació i disseny s'ha igualat i superat àmpliament el que alguns models físics, com les bombolles de sabó o les cordes amb pesos assignats, podien oferir per resoldre problemes geomètrics en arquitectura. El potencial d'aplicació d'aquestes metodologies comença a ser notable degut l'augment en la potència de càlcul dels sistemes digitals que permeten que fenòmens molt més complexos als que podem reproduir físicament es puguin calcular en ordinadors domèstics als quals tothom hi pot tenir accés. Tot i això aquests sistemes o bé han estat entesos com elements auxiliars del CAD que actuen com a complement d'un programa major o bé si han tingut un paper central s'han dedicat a àrees molt específiques del modelatge i per tant si en el primer cas deleguen, sense poder resoldre plenament, el problema del control dels sistemes dinàmics, en el segon no afronten la tasca de presentar un sistema global. El treball d'aquesta tesi en canvi el que pretén plantejar és un sistema de CAD enterament basat en la simulació física. En aquest sentit voldríem anar una mica més enllà i estudiar el que implica un treball enterament basat en lleis físiques de moviment i on els elements estàtics serien únicament auxiliars. Aquest plantejament s'ha començat a insinuar molt recentment i encara no s'ha concretat en cap programa capaç d'explorar totes les possibilitats formals que ofereix. És, doncs, l'ambició d'aquesta tesi el fer un estudi més detallat de les

53 Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmed, D., Tessier, A., Glueck, M., Khan, A., " Physics based generative design", 2009, Publisher: *Les presses de l'université de montréal*, CAAD Futures 2009 Pages: 231-244 **4.1 Freeform Finding using Interacting Elements**

possibilitats, les aplicacions i la capacitat formal que podem obtenir mitjançant l'ús d'aquesta tècnica en el camp de l'arquitectura.

Una temàtica que no hem vist reflectida en els articles i programes tractats és la possibilitat de treballar en dues dimensions a partir d'un sistema general de simulació en tres dimensions. Aquest cas seria una particularitat d'un sistema global 3D que requeriria un tractament especial i que podria donar fruits molt més ràpids, eficaços, senzills i pràctics que els que hem vist fins ara. De fet la possibilitat de dibuixar plànols en dues dimensions amb sistemes dinàmics podria resoldre una gran quantitat de problemes que avui dia tenen els sistemes convencionals de dibuix en CAD en permetre sumar la potència de càlcul al la simplicitat del 2D donant lloc a un sistema àgil i versàtil de dibuix paramètric. En conclusió considero que tant l'aspecte tridimensional com el bidimensional han de ser explorats amb aquesta metodologia per tal de comprovar-ne la viabilitat.

2.3 Fets rellevats en la computació de fenòmens físics

Si bé fins ara hem vist programes dedicats sobretot a l'arquitectura que fan servir d'una manera o una altra algun tipus de simulació física, cal tenir en compte que la simulació física en si és tot un camp que mereix una atenció particular. Per això dedico una part important de l'estat de l'art a investigar el món de les simulacions físiques independentment de l'arquitectura, amb la finalitat tenir una percepció més global del fenomen i de les diferents formes que ha pres en el seu desenvolupament. Aquest recurs es fa servir en àmbits tant diferents com els jocs, les animacions digitals, la ciència o l'enginyeria i en tots ells estan presents diferents variants de sistemes de simulació física. Conèixer com funcionen aquests sistemes ens pot ajudar a preveure correctament les possibilitats que tenim en el món de l'arquitectura d'aprofitar aquestes estratègies correctament.

Actualment el programari informàtic està en un clar procés de diversificació en el qual cada cop hi ha més programes dedicats a funcions específiques amb les quals abordar els diferents aspectes de l'activitat humana ja es tracti d'investigació, disseny o qualsevol altre treball en el qual es puguin fer servir processos de comprovació mecànics. A causa de la varietat de formes i funcions que ha tingut i té, es fa difícil desenvolupar una única metodologia general sobre les estratègies de simulació que pugui ser igualment útil per a cadascun dels casos en els quals pot aplicar-se ja que la diversificació del sector dificulta el fet de plantejar un mètode general de treball. Tot i això es poden classificar les diferents estratègies de simulació segons la seva estructura o plantejament teòric, de manera que es formen una sèrie de famílies en les quals podem situar cadascun dels casos. Difícilment es podran esmentar totes les aplicacions i

estratègies relacionades amb aquests sistemes que s'empren o s'han emprat en algun moment per alguna tasca, però ens proposem ser capaços de donar una visió general del funcionament d'aquesta mena de sistemes, com poden classificar-se i permetre contextualitzar l'actual estudi dins un marc més ampli d'investigació. Val a dir que en el camp de simulacions físiques no sembla que hi hagi gaire estudis previs que intentin oferir de manera exhaustiva una classificació general sobre les diferents estratègies i usos que tenen aquestes tècniques en els sistemes digitals. Ha estat, doncs, un repte de la tesi el trobar no només les diferents estratègies que es fan servir sinó també trobar les nomenclatures adequades en anglès per a molts conceptes que buscats en català o castellà no ofereixen tantes referències ni de la mateixa qualitat.

En relació amb l'arquitectura els sistemes de simulació física s'han aplicat sobretot per al càlcul estructural, de manera que han tingut un paper generalment desconnectat del procés de disseny, fora del que seria el realitzar una comprovació puntual sobre un model predefinit sense participar directament en la seva pròpia definició. Però també hem vist que hi ha hagut una vessant de l'arquitectura que ha fet servir models físics precisament per dissenyar, seguint el procés invers, i que s'ha basat en molts principis que ara trobem reproduïts en el càlcul d'estructures. Aquests sistemes de "form-finding", que s'han fet servir des de la primera aplicació del teorema de la catenària inversa fins a les últimes simulacions d'animació digital per ordinador van néixer com un sistema d'optimització i comprovació estructural de cara a plantejar sistemes ideals per suportar càrregues, o sistemes que inferien la forma de les accions. Ja Gaudí va donar el primer toc d'alertar en demostrar que hi havia un potencial de disseny molt extens, natural i òptim si es plantejava de la manera adequada, sobretot en abandonar una visió del sistema com un mètode lent de comprovació puntual i passar a entendre'l com un sistema pràctic de generació ràpida i àgil va poder donar el salt a un tipus d'arquitectura diferent.

2.3.1 Inicis de la simulació.

Les primeres computacions realitzades per mètodes mecànics van tenir entre els seus objectius principals el realitzar, precisament, simulacions físiques normalment de natura militar i dedicades al càlcul balístic de diferents menes d'obús en condicions atmosfèriques variables. A causa de que els canons van augmentar considerablement el seu abast durant el s. XIX es van necessitar sistemes de computació per poder a predir la posició d'impacte amb un mínim de precisió. Això va fer que a principis del s. XX es comencessin a introduir a les flotes més modernes de la època sistemes de control de tir, que feien servir calculadors mecànics molt primitius per automatitzar el procés de càlcul balístic i que permetessin tenir precisió especialment en condicions atmosfèriques adverses. La introducció de sistemes de computació analògics va ser el primer mecanisme que va permetre la incorporació d'aquests sistemes de computació a la marina. Però

més que el vaixell, el submarí va requerir sistemes de control de tir el més avançats possible ja que els càlculs necessaris per poder llençar amb precisió un torpede són encara més complicats que en el cas de la balística. Durant la segona guerra mundial aquesta mena de sistemes es van desenvolupar en gran mesura en incloure les dades obtingudes dels primers radars navals i dels primers sonars de manera que es coordinessin els sistemes de defensa i atac. Els computadors analògics, doncs, van trobar utilitat en àrees com en els sistemes de defensa costera i en els sistemes de bombardeig dels avions que necessitaven predir on caurien les bombes per poder-les llençar amb més precisió. També van haver d'afrontar una nova classe d'objectius cada cop més complicats d'encertar com és el cas dels avions. Es va fer necessari incloure sistemes de control de tir en canons antiaeris que per raons òbvies necessiten nombrosos càlculs abans de disparar i a més ho han de fer a la major velocitat possible per ser eficients. Aquesta problemàtica va ser un repte que va produir un important avenç dels sistemes de computació a la segona guerra mundial. Norbert Wiener, un dels fundadors de la concepció moderna de cibernètica, treballava precisament en l'àmbit de la defensa antiaèria en el qual el concepte de "feedback" és fonamental en facilitar el control de l'artilleria per part de l'operari. A partir dels seus treballs va concloure que el problema principal no era només tècnic sinó que afectava al concepte d'informació ⁵⁴ de manera que la cibernètica tenia que ser entesa com l'estudi del control i la comunicació en general. Aquesta definició va donar lloc al concepte modern de cibernètica i a tots els camps en els quals s'aplica que no són únicament mecànics sinó també biològics, això va ser una idea revolucionària en el seu temps de la qual en som hereus. Paral·lelament en el camp de la recerca es van començar a aplicar les primeres simulacions dedicades a la computació. El cas més interessant el trobem a finals a de la segona guerra mundial on es desenvolupen les primeres simulacions de computació amb "Hard spheres". Aquestes simulacions es van dedicar al desenvolupament de la bomba atòmica i va ser el primer ús modern de tècniques de computació. Tot i això, la limitada capacitat dels primers mecanismes va obligar a treballar només amb 12 partícules. Com podem veure, ja en els inicis de la computació les simulacions físiques han estat un tema recurrent a l'hora de computar dades i va ser la seva primera funció pràctica que desgraciadament, com tantes altres tècniques, ha tingut el seu origen en a tecnologia militar.

Serà a partir de la segona guerra mundial que els sistemes de computació es començaran a desenvolupar en el sentit modern en el qual els fem servir avui dia. Apareixeran els primers computadors digitals i aquesta nova tecnologia va començar a generar la necessitat de desenvolupar programari per als sistemes de computació que en permetessin explotar les capacitats. Els anys 50 i sobretot els 60 van veure el naixement de nombroses empreses

⁵⁴ François, C., "Systemics and cybernetics in a historical perspective", 1999 *System research and behaviour sciences*, Syst Res. 16, p. 203-219 p.

dedicades a la generació de programari per a sistemes de computació. A més d'això es van madurar les tècniques modernes de programació com és el cas del càlcul d'elements finits i altres metodologies que han tingut aplicacions molt variades mes endavant. Mentre que el primer model de partícules data de finals de la segona guerra mundial, el primer programa de càlcul d'elements finits l'encarrega la NASA a l'any 1965, s'anomenarà NASTRAN aquest no estarà enllestit fins el 1968. Ja a finals dels anys 60 i començaments dels anys 70 apareixen els primers indicis en el món civil d'un interès creixent en la informàtica degut en part a la incorporació de la tecnologia digital. Fins llavors les computadores havien estat analògiques, cosa que implicava un maquinari de dimensions considerables que òbviament no era a l'abast de tothom. La introducció de la tecnologia digital augmenta la velocitat de computació i permet una major miniaturització del maquinari, gràcies a això es comença a plantejar l'ús comercial dels mateixos i per tant l'ús de programari adequat per a la nova situació. A la vegada que es comencen a fer tots aquests desenvolupaments, en el camp de la ciència comencen a fer-se les primeres simulacions informàtiques d'ús didàctic aplicades a la física. Un dels primers investigadors en aquest camp va ser el professor Alfred Bork, expert en informació i sistemes de computació. Ja des de 1968 Bork va començar a desenvolupar sistemes de simulació física aplicats a l'ensenyament com una manera d'ajudar a l'estudiant a visualitzar els processos físics i per tant entendre'ls millor. En aquests moments les simulacions encara es redueixen a la reproducció de fórmules abstractes de manera que els resultats eren molt diferents de les modernes tècniques de visualització. Tot i això, ja llavors els sistemes de càlcul van permetre que els càlculs complexos es tornessin molt més accessibles a l'estudiant com posa de manifest la següent cita "[...] enabling the student to explore a broader range of more meaningful problems. Both, student and teacher are no longer restricted to the classical setpiece problems of physics by the students, but are free to go as far and as fast as physical understanding can carry them" ⁵⁵.

Així, doncs, veiem que l'autor insisteix en la capacitat dels sistemes de computació per superar les pròpies limitacions de càlcul augmentant la capacitat d'exploració de casos i visualitzar les idees de manera molt més entenedora. L'alumne pot obviar les operacions repetitives de fórmules i veure els resultats com una continua evolució de manera que capta molt millor el fenomen. En aquest cas, doncs, s'entén l'eina digital com un sistema auxiliar pedagògic, per complementar la teoria amb un sistema d'avaluació pràctic de les idees esposades. Aquest ús de

⁵⁵ "Capacitant a l'estudiant per a explorar un ventall més ampli de problemes més significatius. Tant els alumnes com el professor ja no s'han de limitar als problemes clàssics de la física si no que poden anar tant lluny i tant ràpid com l'enteniment de la física els ho permeti." Bork, A. M., others, *Introductory computer based mechanics; A one week sample course*, 1968,

la simulació física com una eina didàctica es torna molt popular als anys 70 i apareixen nombrosos articles que seguint la línia de A. Bork fan servir les simulacions com eines de comparació i anàlisi pels estudiants. És fan experiències en tots els camps ja sigui en mecànica clàssica, estudi d'ones, estadística o quàntica.

També als anys 70 es fa un pas important de cara a fer simulacions físiques més potents perquè es plantegen els sistemes de càlcul iteratius basats en petits intervals de temps de manera que ja no operaran una única fórmula per obtenir un resultat sinó que repetiran una fórmula múltiples vegades fins a obtenir un resultat desitjat. Aquest mecanisme és essencial en el camp de la recerca ja que permet aproximar solucions sense coneixement previ de quin pot ser el resultat sent els sistemes que no tenen solució numèrica lineal els candidats ideals per aquesta estratègia. Però les iteracions no tenen perquè aplicar-se únicament en sistemes basats en el temps, són una eina més i també es poden plantejar sistemes iteratius que resolguin sistemes insolubles d'equacions per força bruta de computació, això vol dir, provant diferents valors de variables fins que l'equació es resol. Els sistemes genètics d'aproximació dels resultats funcionen amb aquest mecanisme però amb moltes estratègies d'optimització que intenten minimitzar els passos per obtenir una solució òptima. Com veiem, en tots dos casos, la iteració és una eina fonamental dels sistemes de computació per solucionar problemes insolubles. Un clàssic d'aquestes casuístiques és la interacció gravitatòria entre tres cossos amb masses similars, problema per al qual no hi ha solució lineal possible de manera que no pot ser resolt amb sistemes de matrius. Aquesta mena de problemes són el cas ideal per sistemes de càlcul iteratius. En la introducció de l'article "Solution to the three body problem by computer" de David McCandlish (1973) l'autor diu: "The general three body problem have never been solved analytically, but it is surprisingly simple to solve by using a small digital computer"⁵⁶. Si ens fixem en la data de l'article veurem que aquesta frase es pronuncia a principis dels anys 70, quan els sistemes de simulació física s'enfocaven des d'una vessant més dedicada a l'ensenyament que a la recerca. Per això encara no es tracta d'una investigació pròpiament dita sinó més aviat d'una potencialitat que s'apunta de cara al futur. Fixem-nos que el primer que es posa de relleu, malgrat ser sistemes amb molt poca capacitat de computació comparats amb els sistemes actuals, és la recursivitat com a eina per aproximar solucions que com hem vist serà fonamental de cara al futur. Apareixen també mencionats un parell de conflictes més, de caire tècnic, que en realitat són les típiques falles de sistemes iteratius de simulació amb partícules; El primer és la

⁵⁶ "El problema de calcular la òrbita de tres cossos no ha estat mai resolt de forma analítica, però en canvi és sorprenentment senzill de resoldre amb un petit ordinador digital" McCandlish, D., "Solution to the three body problem by computer",

1973, *American journal of physics*, P. 928-929

pèrdua de precisió per distàncies massa petites en relació a la velocitat o l'acceleració que experimenten les partícules, aquest problema només es pot solucionar si es redueix l'interval de temps. L'altra problema és que el sistema no compleixi la conservació de l'energia i de fet en l'article es menciona el següent: "It is a curious fact that the calculated total energy maybe be in error by a factor of 1000, while total linear momentum, velocity of the center of mass, and total angular momentum are conserved to at least six significant figures. These later three quantities depend on Newton's Third Law, wich is automatically satisfied at each step of the calculation ".⁵⁷ Aquest problema és molt recurrent en sistemes de simulació basats en partícules i requereixen d'algun mecanisme regulador com la fricció que dissipï l'energia sobrant. De fet el primer problema és el que porta al segon ja que el sistema naturalment conserva la quantitat d'energia total si els càlculs són correctes, però al patir imprecisions greus per distàncies mínimes en relació a velocitats extremes, apareix o desapareix energia del no-res a causa de la imprecisió. Aquests error es torna acumulatiu de manera que poc a poc es va incrementant i al final podem tenir importants desviacions respecte a la solució correcta.

2.3.2 Gràfics i animació

Els anys 70 representen també la inauguració dels primers assaigs en temes gràfics i d'animació, Ja siguin en imatges de dues dimensions o bé amb models lineals es comença a percebre la capacitat d'aquests sistemes per generar efectes especials a les pel·lícules. Sorprenentment trobem que ja al 1974 a la universitat de Utah es realitza un estudi anomenat "FACES" en el qual a partir de cares virtuals es fan les primeres animacions basades en gesticulacions molt bàsiques. Són encara sistemes primitius de visualització però que ja apunten el que serà el posterior desenvolupament d'aquest camp, però el més important és que plantegen per primer cop el tema de l'animació en el camp gràfic, un camp que actualment està en plena expansió. Durant els anys 80 els computadors es comencen a miniaturitzar de manera que augmenten considerablement la seva potència reduint el consum i l'espai necessaris, gràcies a això els sistemes de simulació física es poden començar a plantejar més enllà del que serien únicament aplicacions didàctiques per passar a ser una eina d'investigació i de representació gràfica realista. Durant aquesta dècada es comencen a explotar les tècniques desenvolupades als 70 per fer

⁵⁷ "És curiós que si bé l'energia total del sistema pot tenir un factor d'error de 1000, el moment lineal total, la velocitat del centre de masses i el moment angular total es conserven fins al sisè decimal. Aquests tres valors depenen de la tercera formula de newton i és compleixen automàticament a cada iteració" " McCandlish, D., "Solution to the three body problem by computer", 1973, *American journal of physics*

propostes de cara l'estudi de fenòmens complexos, fins i tot caòtics, que per la seva complexitat o manca de formulacions lineals no poden ser resolts sense suport digital ^{58 59}. Gràcies a aquest augment de potència els sistemes digitals a partir dels 80 poden simular les interaccions entre grans nombres de partícules, obrint, doncs, la porta a estudis molt més interessants de cara a la investigació. Aquesta capacitat per simular nombres elevats de petits elements és precisament allò en que ens basarem de cara fer servir els sistemes físics com una eina de treball ja que com veurem això permet tractar els problemes com a dinàmiques de grup que resolen de manera relativament ràpida i fàcil problemes sense solució única. Però aquesta millora dels sistemes digitals dels anys 80 no es deixa sentir únicament en el camp de la investigació, també en la vessant gràfica comença a desenvolupar-se l'ús de les tècniques digitals, que ja comencen a ser capaces de treballar amb imatges de "render" i petites animacions, precisament són les animacions les quals porten a desenvolupar sistemes d'animació capaços de donar un moviment realista als cossos. Enfocats en aquesta direcció comencen a aparèixer articles sobre les possibles aplicacions dels sistemes cinètics en el camp de l'animació ^{60 61}. Demetri Terzopoulos és el primer autor que escriu amb profusió sobre sistemes cinètics dedicats a animació publicant nombrosos articles i realitzant conferències relacionades amb l'aplicació d'aquesta estratègia. En ells es toquen temàtiques tant diferents com el camp de l'animació dedicat als efectes especials, els sistemes "hàptics" (veure capítol 2.3.11) o la medicina, tots ells publicats en un període de temps que va dels anys 80 fins al 2000.

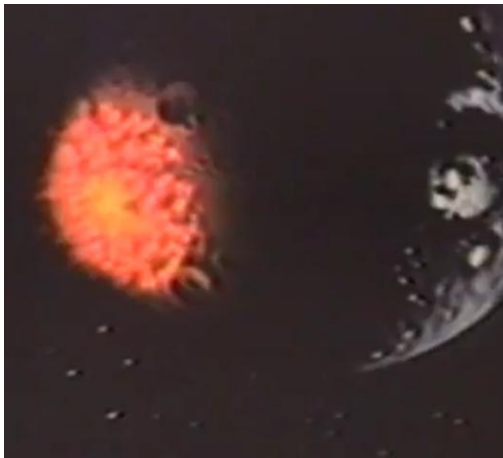


Fig 14. Un dels primers exemples d'animació dedicada al cinema el trobem al 1982, en una seqüència de la pel·lícula "Star Trek: The Wrath of Khan", on es simula l'explosió i posterior formació d'un planeta. Es va fer servir un sistema de partícules per a la simulació de l'explosió.

58 Tajima, T., Clark, A., Craddock, G. G., Gilden, D. L., Leung, W. K., Li, Y. M., Robertson, J. A., Saltzman, B. J., "Particle simulation of plasmas and stellar systems", 1985, *American Journal of Physics*, Volume 53, Issue 4, pp. 365-370.

59 Drish, W. F., Wild, W. J., "Numerical solutions of Van der Pol's equation", 1983, *American Journal of Physics*, Volume 51, Issue 5, pp. 439-445.

60 Terzopoulos, D., "Physically based modeling: past, present and future", 1989, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* Volume: 23, Issue: 5, Publisher: ACM Press, Pages: 191-209

61 Reeves, W. T., "Particle systems a technique for modeling a class of fuzzy objects", 1983, *ACM Trans. Graph.*, pp.91-108.

Cap a principis i mitjans dels anys 90 es publiquen alguns articles relacionats amb l'eficiència dels sistemes de modelatge en general i la seva capacitat pel disseny industrial ^{62 63}. Podem llegir com Fumihiko Kimura exposa que: "Hence, the architecture of future CAD systems has to be highly dynamic, and it has to provide tools for model evaluation during the entire design process. To support reasoning at the object level and the system level, facilities for reflection and self-introspection [...]"⁶⁴

Com hem pogut llegir el plantejament d'una geometria dinàmica comença a ser rellevant a nivell de tècniques de disseny i en alguns casos es fan les primeres referències als sistemes de simulació física ^{65 66}. Alguns anàlisi estudiaven com podia ser l'impacte de les tècniques cinètiques en el camp del modelatge posant de manifest que és un sistema extremadament intuïtiu de treball i per tant teòricament ideal per aproximar el projecte en la fase inicial de disseny. Terzopoulos, per exemple, amb la col·laboració de Hong Qin, introdueix al 1994 el concepte de D-NURBS com a una estratègia basada en sistemes cinètics de treball que permeten aplicar aquesta aproximació al procés de modelatge basat en el sistema de NURBS (veure capítol 3.2.7). Fixem-nos en els arguments que exposa per defensar l'aplicació d'aquests sistemes.

"The behavior of the deformable model is governed by physical laws. Through a computational physics simulation, the model responds dynamically to applied simulated forces in a natural and predictable way. Shapes can be sculpted interactively using a variety of force-based 'tools.'
The equilibrium state of the dynamic model is characterized by a minimum of the potential energy of the model subject to imposed constraints. It is possible to formulate potential energy

62 Mandorli, F., Otto, H. E., Kimura, F., "A reference kernel model for feature-based CAD systems supported by conditional attributed rewrite systems", 1993, *SMA 93 Proceedings of the Second Symposium on Solid Modeling and Applications* pp. 343-354

63 Kagan, P., Fischer, A., Shpitalni M., "Intuitive physically based CAD system for designning os sculptured surfaces", 1996, *CIRP Annals - Manufacturing technology* volume 45, Issue 1, Pages 121-124

64 "... per tant, el futur de les eines de CAD esta en ser molt dinàmic i ha d'oferir eines per a l'avaluació del model durant tot el procés de disseny. Per permetre el raonament a nivell d'objecte i de sistema, cal desenvolupar ajudes per a la reflexió y la introspecció..." Mandorli, F., Otto, H. E., Kimura, F., "A reference kernel model for feature-based CAD systems supported by conditional attributed rewrite systems", 1993, *SMA 93 Proceedings of the Second Symposium on Solid Modeling and Applications* pp. 343-354

65 Thingvold, J. A., Cohen, E., "Physical modeling with B-spline surfaces for interactive design and animation", 1990, *ACM SIGGRAPH Proceedings of the 1990 symposium on Interactive 3D graphics* pp. 129-137

66 Kagan, P., Fischer, A., Shpitalni M., "Intuitive physically based CAD system for designning os sculptured surfaces", 1996, *CIRP Annals - Manufacturing technology* volume 45, Issue 1, Pages 121-124

functionals that satisfy local and global design criteria, such as curve or surface (piecewise) smoothness, and to impose geometric constraints relevant to shape design. "67

Com veiem els punts exposats apel·len a la capacitat dels sistemes cinètics per establir una relació positiva amb l'usuari i la capacitat de generar de manera natural certes condicions de geometria sense que per això deixin de ser compatibles amb els mètodes tradicionals. El més important d'aquest cas és que reforcen la idea de que els sistemes cinètics són ideals per a reproduir elements naturals i que per tant poden generar amb facilitat formes orgàniques que desgraciadament en la major part dels casos no són constructives. Fer-les constructives és un repte que alguns programes han començat a estudiar a fons amb els processos de tesselació però aquestes tècniques són posteriors tal com veurem més endavant.

També als anys 90 es comencen a proposar els sistemes cinètics com un programari necessari per a relacionar-se amb els sistemes de treball "hàptics" (veure capítol 2.3.11) que són aquells que involucren la percepció sensorial del model digital a través d'un aparell que simuli aspectes de tacte i resistència. Les simulacions físiques són el programari natural per operar conjuntament amb un sistema de maquinari de comunicació tàctil que involucri percepcions sensorials ja que reproduïxen i parametritzen els fenòmens físics que tenen lloc a la natura. Aquesta aproximació sensorial ha estat explorada pel camp de la medicina⁶⁸ tot i que les simulacions de teixits són un tema habitual ^{69 70}. No és estrany que la medicina s'hagi mantingut a mig camí entre els sistemes

67 "El comportament d'un model deformable esta controlat per les lleis de la física. A través simulador físic el model respon de manera dinàmica a l'aplicació de forces simulades de manera natural i predictable. Les formes es poden modelar de forma interactiva fent servir diferents eines basades en forces. L'estat d'equilibri es caracteritza per oferir un mínim d'energia potencial per a unes condicions donades. Es possible formular funcions d'energia potencial que satisfacin criteris locals o generals de disseny, com la suavitat d'una corba o una superfície, i imposar condicions geomètriques importants per donar forma al disseny." Terzopoulos, D., Qin, H., "Dynamic NURBS with geometric constraints for interactive sculpting", 1994, *ACM Transactions on Graphics*

Volume: 13, Issue: 2, Publisher: IK, DTU, Pages: 103-136 **Pag 2**

68 Webster, R., Haluck, R. S., Zoppetti, G., "A haptic surgical simulator for laparoscopic cholecystectomy using real-time deformable organs", 2003, *Proceedings of the IASTED International Conference Biomedical Engineering* June 25-27 pp. 219-221

69 Bajaj, C. L., Karlapalem, L. C., "Volume subdivision based hexahedral finite element meshing of domains with interior 2-manifold boundaries", 2006, AFRIGRAPH '06 *Proceedings of the 4th international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa*, pp. 127-136

70 Bridson, R., Teran, J., Molino, N., Fedkiw, R., "Adaptive physics based tetrahedral mesh generation using level sets", November 2005, *Engineering with Computers* Volume 21 Issue 1, , pp. 2-18

d'animació i els models científics de formulació ja que necessiten tant el realisme de les simulacions científiques com l'eficiència dels sistemes digitals de manera que trobem alguns articles de Terzopoulos dedicats al tema ⁷¹. Aquesta combinació de factors fa dels sistemes cinètics i les malles aplicats a la medicina un terreny amb molt d'interès des del punt de vista tècnic i de modelatge.

Malgrat tot aquest interès en el tema els sistemes cinètics fins ara no han tingut gaire ressò com a sistemes de modelatge de peces o de processos de desenvolupament conceptual del disseny degut segurament a tres factors importants. El primer és la limitada capacitat dels ordinadors domèstics per realitzar simulacions físiques, que són sistemes que requereixen d'una gran potència de càlcul. Fins a mitjans de la primera dècada del 2000 la potència dels ordinadors era molt limitada en aquest àmbit cosa que impedia que es pogués generalitzar el seu ús. A això cal afegir un segon punt important i és que el món de l'enginyeria, que és el que de moment ha donat lloc a les principals eines de treball digitals, ha optat per models de tipus paramètrics més que no pas de simulació física de manera que no s'ha contemplat aquesta possibilitat. Segurament a les limitacions en temps de càlcul cal afegir un tercer inconvenient i és una certa manca de control del resultat han estat la causa principal que ha limitat l'ús d'aquestes tècniques com a un sistema de modelatge universal ja que el moment en el qual el model guanya complexitat tant les relacions que cal controlar com els càlculs necessaris per processar les interaccions entre elements creixen tant en complexitat que es fa molt difícil per a una persona mantenir-los sota control. Si bé el resultat pot ser previst, no sempre pot ser controlat amb prou precisió (veure 1.2.1.1). De manera que la manca de control sobre el resultat s'erigeix com un dels majors inconvenients en l'ús de sistemes digitals i no és un problema de fàcil solució quan es requereix un control precís del resultat. Això no ha impedit que recentment s'hagi realitzat alguna tesi especulant sobre el possible ús que podria tenir per realitzar distribucions en planta⁷².

2.3.3 Estat actual

On estan tenint una forta presència els sistemes de simulació és en el camp de l'animació digital on s'implementen com a Plug-in en molts programes de modelatge dedicats a la generació de seqüències de gran realisme a partir de simular el comportament real dels cossos i les col·lisions. En aquest àmbit han tingut un ús puntual en la confecció d'alguns dissenys ⁷³ ja que encara que no sigui la finalitat principal del programa s'han pogut fer servir per dissenyar models

71 McInerney, T., Terzopoulos, D., "Deformable models in medical image analysis: A survey", 1996, *Medical Image Analysis*, 1 (2), pp. 91-108

72 Arvin, S. A., *Physically based mechanical metaphors in architectural space planning*, 2005, Texas A&M University.

73 Kolarevic, B., *Architecture in the digital age · design and manufacturing*, 2003, Taylor and Francis group, **Pag 123 - 137**

arquitectònics però sempre amb l'inconvenient de que no són eines pensades per a l'arquitectura. Quasi tots els programes de modelatge tenen mòduls que inclouen simulacions d'elements físics com és el cas de MAYA (mòdul Bullet), 3D Studio (Reactors), Rhino (mòdul Kangaroo) o SketchUp amb mòduls que es poden descarregar. Actualment aquests sistemes també estan sent bastament explorats pels programadors de jocs ⁷⁴ per poder aplicar-se a interaccions amb l'usuari en temps real. Les primeres animacions reproduïen el comportament d'elements sòlids o elàstics sotmesos a diferents forces i situacions⁷⁵ però actualment s'estan plantejant sistemes que simulen la dissolució d'elements sòlids per l'acció d'un fluid corrosiu en temps real ⁷⁶ gràcies a l'ús d'estratègies extremadament eficients de càlcul i a que s'estan generant targetes gràfiques dedicades a càlculs cinètics que augmenten considerablement la velocitat de processat. Aquesta idea s'està enfocant de cara a la representació de jocs però pot tenir conseqüències que afectarien probablement a l'àrea del disseny ja que comença a ser habitual que les tecnologies desenvolupades per als jocs acabin sent emprades en sistemes de visualització i modelatge CAD. De moment ja s'estan desenvolupant sistemes de maquinari específics que obliguen a unificar la programació dels sistemes de simulació física en fer servir unes funcions comuns preprogramades en el maquinari de la targeta. Això és fonamental de cara a l'expansió en l'ús d'aquestes tècniques ja que fins ara cada simulació física feia servir unes formulacions pròpies i específiques que dificultaven un ús coordinat amb altres programes ⁷⁷ a causa de que només l'autor en coneixia el funcionament prou a fons com per a fer-ho servir. Però ara, amb l'estandardització dels sistemes de simulació s'estan plantejant sistemes unificats de càlcul. Possiblement aquest fenomen donarà lloc a una explosió en l'ús d'aquestes tècniques en un futur proper de cara al control de geometries complexes i de sistemes d'optimització dedicats al disseny. Cal entendre que el que va començar com un sistema exclusivament gràfic està guanyant cada cop més terreny en àmbits que no són purament gràfics de manera que s'estan generant un camp d'investigació nou en el qual s'inclou la visualització, l'animació i la interacció amb l'usuari. Per altra banda és un fet obvi que les eines CAD recullen molts mòduls i estratègies desenvolupades en el món dels vídeo jocs de manera que no seria gens d'estranyar que aquest fenomen es tornés a repetir amb l'ús de sistemes d'animació unificats al món del CAD. Actualment però hi han unes tipologies molt definides de simulació que descriure a continuació i

⁷⁴ GPU Gems 3, PART V: Physics simulation **PART V: Physics simulation"**

⁷⁵ Terzopoulos, D. Platt, J., Barr, A., Fleischer, K., "Elastically deformable models", 1987, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* Volume: 21, Issue: 4, Publisher: ACM Press, Pages: 205-214

⁷⁶ Benes, B., "Real-time erosion using shallowwater simulation", 2007, *Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulation "VRIPHYS"* pp. 43-50

⁷⁷ Clarke, J.A., Hirsch, J. J., Buhl, W. F., Erdem, A. E., Winkelmann, F. C., "Planned developments in building energy simulation", July 1986, Proc. of the CIB 5th International Symposium, Bath, England.

que ens donen una idea general de la dispersió del sector que, com hem exposat, possiblement s'anirà unificant en els pròxims anys.

2.3.4 Classificació dels sistemes de simulació física

L'objectiu principal de tota simulació física digital és imitar de la manera més precisa numèricament i/o visualment versemblant la realitat física. Per poder-ho fer es farà servir un model teòric extret de la física que s'aplicarà sobre una base de dades. Aquesta base de dades descriurà un model real. Aquest model es transformarà per mitjà de l'acció d'algorismes que imitaran les forces i comportaments naturals dels objectes físics. Per tant una simulació física és un procés de transformació mecànic de la informació que imita la realitat. Amb aquest procés es poden reproduir objectes sòlids, elements viscosos, líquids o gasos. Cal tenir en compte que els processos amb els quals transformem la informació també responen a les necessitats del programador i no exclusivament a la base teòrica del programa. Així, doncs, no tot el que passa en un model és únicament resultat de la teoria, també passen moltes coses que són conseqüència de com està estructurada la informació en un sistema digital i de com aquest la transforma. Cal tenir en compte, doncs, que les coses poden simular-se si es poden programar i tot i que pugui semblar una limitació en realitat comporta certs avantatges ja que és un test de validesa per a la teoria.

Els sistemes actuals de simulació fan servir una sèrie limitada de plantejaments que han demostrat la seva funcionalitat al llarg dels temps. El seu tractament però ha variat considerablement segons el cas i aquí cal fer una primera distinció entre simulacions digitals segons la finalitat del programa. Si la simulació té per finalitat un estudi científic cal que aquest sigui d'alta precisió i que simuli amb el màxim realisme possible el comportament real de l'element estudiat perquè el resultat pugui ser suficientment fiable com per tenir valor tècnic. És per això que aquesta mena de programes de tipus científic acostumen a fer servir fórmules costoses per a la màquina en temps de computació. Però hi han altres aproximacions que necessiten tenir una forta interactivitat amb l'usuari i que no es poden permetre el luxe de tenir llargs temps de càlcul per cada interacció. Normalment es tracta de programes que provenen del món dels vídeo jocs o de les simulacions mèdiques de teixits, i que han de treballar intensament amb l'usuari de manera que requereixen models molt menys costosos per la màquina. Aquests dos plantejaments han donat lloc a diferències de programació que s'acostumen a traduir en estratègies molt diferents per abordar els problemes tot i que podem fer servir models bàsics comuns. Per exemple trobem el model de partícules com a model bàsic que pot tenir molts usos en totes dues àrees, es basa pràcticament sempre en el mateix esquema però els diferents

matisos en els algorismes interns fan que els resultats i els temps de càlcul variïn considerablement.

Quan volem classificar els sistemes de simulació física cal definir quins criteris farem servir per diferenciar-los. En el nostre cas fem servir les estratègies de programació com a criteri de classificació perquè acostumen a mantenir una relació molt directa amb el fenomen simulat i per altra banda qualsevol altre criteri pot ser relativament subjectiu. En una simulació cal distingir entre dos aspectes bàsics de la programació, l'estructura de la base de dades i els algorismes. Essencialment qualsevol sistema digital es basa en emmagatzemar informació i transformar-la segons una sèrie d'algorismes en els quals pot intervenir o no l'usuari. El procés de transformació no fa altra cosa que "deduir" o combinar les dades prèvies per generar-ne de noves. Un cop obtingudes les emmagatzema perquè no es perdin. La manera com aquesta informació es guarda és essencial ja que segons el criteri amb el que quedi ordenada, o segons la mena de dades que desi, ens facilitarà o ens dificultarà certs càlculs. En el cas de les simulacions físiques veurem que hi ha moltes maneres de descriure un objecte i que cada manera permet reproduir un aspecte diferent de la realitat. Si volem imitar el comportament d'elements amorfs ens és molt més fàcil fer servir un sistema de volums finits en el qual la massa sigui una xifra que fluctua d'un lloc a l'altre que no pas un sistema de partícules en els quals sigui la posició la xifra que fluctua i la massa el valor fixat, en plantejar cadascun d'aquests dos esquemes veiem que hi ha aspectes que són més fàcils d'imitar i altres que són més difícils o que no estan contemplats per això la base de dades ha de guardar una íntima relació amb el que volem reproduir. També els sistemes de càlcul tenen un gran efecte sobre el tipus de simulació que fem servir ja que segons la manera com transformem la informació podrem intervenir o no en el procés, o ens donarà un tipus de resultat diferent. En conclusió la base de dades i els algorismes formen un conjunt amb un cert potencial de simulació en el qual segons com organitzem la informació i com definim el nostre codi anirem obtenint els diferents sistemes de simulació aquí esmentats.

2.3.5 Càlcul per passos finits o diferencials

Els sistemes de càlcul es divideixen en dues grans famílies segons si disposem de fórmules capaces de resoldre les equacions plantejades de forma directa o diferencial. Quan no disposem de fórmules precises un dels sistemes més intuïtius per calcular el comportament de fenòmens dinàmics, com la simulació de processos físics, és fer servir equacions diferencials finites per aproximar el càlcul del resultat precís, de manera que es pot aproximar el resultat d'una equació diferencial pas a pas a partir d'una única fórmula que es va calculant de manera repetitiva fins que convergeix a alguna mena de resultat. Aquest mètode no ens assegura un resultat

perfectament precís però pot aproximar-se molt a la solució correcta o com a mínim, tot i no oferir el resultat exacte, pot ser útil de cara a la investigació per observar comportaments generals en un conjunt d'elements ^{78 79}.

La imprecisió en aquesta mena de mètodes depèn del factor de discretització, com més gran és el salt entre un càlcul i el següent més possibilitats d'error tenim, per això un interval petit dona més precisió que un interval gran. En els càlculs físics basats en la física newtoniana és el temps el que discretitza el càlcul i per tant segons la relació que mantenen la distància entre les partícules respecte al temps la precisió augmenta o disminueix⁸⁰. A més d'això tenim errors deguts al factor d'arrodoniment dels valors numèrics que s'anomena "round-off error"⁸¹, ja que un ordinador no pot guardar un valor amb una precisió infinita, de manera que, tot i ser minúscul en els sistemes contemporanis, hi ha un petit arrodoniment per cada valor obtingut amb el càlcul. Aquest arrodoniment s'acumula amb cada repetició de la fórmula i pot donar lloc a errors de certa magnitud si aquesta acumulació produeix un augment o disminució acumulatiu i exponencial d'algun valor, tot i que en condicions normals s'acostuma a mantenir l'equilibri entre guanys i pèrdues degudes a l'arrodoniment de manera que no afecta visiblement al càlcul. Un altre problema clàssic que trobem en aquesta mena d'algorismes té a veure amb la conservació de l'energia, aquest fenomen és conegut com "energy drift" ⁸² i tendeix a tenir lloc en simulacions per intervals de temps finits. Aquest pot ser un gran problema perquè pot donar-se el cas, en condicions extremes, de que les reaccions no es corresponguin a les accions rebudes a causa de que hi hagi un canvi extrem de les condicions entre un pas i el següent. Com que aquest fenomen acostuma a ser acumulatiu pot desencadenar una reacció en cadena en la qual com més energia tenim més en generem i l'error, un cop generat, ja no es pot eliminar sinó que s'arrossega. Impedir que això passi és un tasca difícil que requereix sobretot evitar situacions extremes o variar la magnitud de la iteració segons les condicions del simulador fent que aquesta es redueixi quan es vagi a produir un canvi brusc de les condicions. Per evitar aquest fenomen es pot donar un valor general de fricció a tot el model fent que hi hagi una pèrdua constant d'energia que reguli els possibles guanys deguts a errors de càlcul. Aquest mecanisme tot i invalidar el resultat científic de la simulació en cas de buscar una relació ràpida i fluida és molt eficaç.

78 Tajima, T., Clark, A., Craddock, G. G., Gilden, D. L., Leung, W. K., Li, Y. M., Robertson, J. A., Saltzman, B. J., "Particle simulation of plasmas and stellar systems", 1985, *American Journal of Physics*, Volume 53, Issue 4, pp. 365-370.

79 Auer, S. *Realtime particle-based fluid simulation* 2010 Technische Universität München

80 McCandlish, D., "Solution to the three body problem by computer", 1973, *American journal of physics*, P. 928

81 <http://isdl.cau.ac.kr/education.data/numerical.analysis/Lecture2.pdf>

82 Cottrell, D., Tupper, "P. F. Energy Drift in Molecular Dynamics Simulations", 2006, *BIT Numerical Mathematics* September 2007, Volume 47, Issue 3, pp 507-523

Entre les diferents maneres que hi ha de discretitzar el càlcul la més habitual consisteix en fraccionar el temps en petits intervals. Per cadascun d'aquests intervals anem calculant alguna equació en base als resultats de l'equació anterior de manera que anem aproximant l'evolució al llarg del temps d'aquell aspecte. Un dels exemples més entenedors és el cas de les fórmules de la gravitació universal de Newton aplicades a partícules que es poden implementar fàcilment amb aquest mètode⁸³. A partir de petits intervals de temps podem obtenir paràboles, cercles o el·lipses formades per petits trams rectes que es corresponen amb els intervals de temps definits, de manera que tot i no ser un resultat exacte si que si disminuïm d'interval de temps els resultat es va tornant progressivament més i més precís.

Tot i els diferents inconvenients que s'han plantejat aquests sistemes són els mecanismes més versàtils i robustos dels quals disposem, accepten un espectre molt ampli de situacions i en alguns casos toleren fàcilment la interacció directa amb l'usuari. Per altra banda permeten simplificar les operacions de càlcul en fraccionar-les en intervals i així assolir resultats que no són directament operables. La implementació d'aquests mecanismes obre, doncs, les portes a la simulació d'un espectre molt ampli de casos amb la possibilitat d'obtenir resultats imprevisibles. Aquest últim concepte ens sembla especialment important, sobretot de cara a l'arquitectura, ja que en el moment en el qual no podem preveure com serà un resultat apareix la possibilitat de crear en el sentit de plantejar solucions inesperades a problemes ja coneguts. Per altra banda els resultats poden observar certs aspectes tècnics de manera que no quedin com a simples elucubracions teòriques sinó que realment siguin elements que mantenen relació amb la realitat. Amb un sistema de comportament perfectament previsible això no és possible perquè coneixes quin serà el resultat en plantejar el problema.

2.3.6 Càlcul directe ⁸⁴

En contrast amb els sistemes iteratius de càlcul trobem els sistemes directes que solucionen les equacions de forma exacta en un nombre finit de passos. Aquests sistemes només són aplicables en el cas que les funcions lineals tinguin solució i es calculen a partir de sistemes de matrius. Aquest plantejament neix de les matemàtiques prèvies als sistemes digitals en les quals no era possible repetir un càlcul centenars de cops fins que convergís a un resultat sinó que calia resoldre els sistemes de forma directa per obtenir els resultats exactes amb el mínim nombre de passos possible. En aquest sentit aquesta mena de càlcul té importants avantatges sobre els sistemes iteratius en els casos senzills que impliquin un nombre reduït d'operacions amb models

⁸³ McCandlish, D., "Solution to the three body problem by computer", 1973, *American journal of physics*, P. 928-929

⁸⁴ Poschmann, P., Komzsik, L., Mayer, S., "Direct Or Iterative? A dilemma For The User", 1998, *MSC Americas Users' Conference* #2698

de poca complexitat i poc ús de memòria ja que el resultat obtingut és absolutament precís i no necessita d'un procés d'aproximació gradual per generar-se. Al principi de l'era informàtica la major part de simulacions eren d'aquest tipus i feien servir aquest mètode que estalviava memòria i temps de càlcul en sistemes que tenien molt poca potència, però a mesura que les simulacions van guanyar complexitat i els sistemes digitals van augmentar la seva potència van començar a fer-se servir sistemes iteratius per problemes que no eren resolubles de forma directa⁸⁵ o que plantejaven matrius de solució massa grans que tenen un rendiment baix⁸⁶. Aquest fet és especialment notori en tot el que està relacionat amb la manipulació d'elements en espais de tres dimensions amb molts graus de llibertat⁸⁷ que plantegen matrius de solució extremadament complexes. Altres problemes relacionats amb els sistemes directes de càlcul tenen a veure amb el problema abans esmentat del "round-off" ⁸⁸, com que el resultat s'obté a partir de diversos càlculs amb matrius que també plantegen aquest problema el resultat no deixa de tenir marge d'error que pot ser significatiu per matrius molts grans.

En el nostre cas, en plantejar un sistema de CAD en 3D en el qual volem visualitzar i interactuar amb el model en temps real, no tenim altre remei que fer servir un sistema iteratiu de càlcul. Amb un mètode directe no podríem visualitzar l'evolució del model perquè aquesta seria instantània per altra banda tampoc podríem intervenir en el procés ja que no seria gradual. Al final la complexitat de les fórmules seria pràcticament inabordable i per això no ho hem considerat adequat. En conclusió és una estratègia que no farem servir de forma general ja que no convé als plantejaments de la tesi.

2.3.7 Càlcul d'elements finits ⁸⁹

Amb la finalitat de poder preveure el comportament dels materials en diferents estats de càrrega es planteja un sistema de computació que acostuma a esgotar al màxim la capacitat de computació de la màquina i que ofereix resultats precisos sobre les deformacions i estats tensionals d'una peça sotmesa a una càrrega concreta. Aquesta mena de sistemes han estat

⁸⁵ Tajima, T., Clark, A., Craddock, G. G., Gilden, D. L., Leung, W. K., Li, Y. M., Robertson, J. A., Saltzman, B. J., "Particle simulation of plasmas and stellar systems", 1985, *American Journal of Physics*, Volume 53, Issue 4, pp. 365-370.

⁸⁶ Kalambi, I. B., "A Comparison of three Iterative Methods for the Solution of Linear Equations", 2008, *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* December, 2008 Vol. 12(4) P. 53 - 55

⁸⁷ Saad, Y., *Iterative Methods for Sparse Linear systems*, 2000, Stanford University – **Preface**

⁸⁸ TURING, A. M., "Rounding-off errors in matrix process" (1947), *Q J Mechanics, Appl Math* 1948, 1 (1): 287-308. doi: 10.1093/qjmath/1.1.287

⁸⁹ Peiró, J., Sherwin, S., "Finite difference, finite element and finite volume methods for partial differential equations", 2005, *Handbook of Materials Modeling*. Volume I: Methods and Models, 1–32. Springer.

àmpliament utilitzats per l'enginyeria en general i inclouen també el càlcul d'estructures en edificació com a aplicació general en arquitectura. El càlcul d'elements finits funciona a partir de la subdivisió d'un element en petites parts més senzilles a les quals se'ls poden aplicar funcions iteratives o de càlcul directe per calcular el seu estat tensional i la seva deformació. En el cas de peces sòlides cal un desglossament del volum de la peça en elements senzills com cubs o tetràedres relativament regulars. Normalment aquestes subdivisions generen una malla la densitat de la qual varia segons la importància de la zona estudiada, recentment s'han desenvolupat tècniques que permeten augmentar la densitat de la malla⁹⁰ segons l'estat de tensions dins de la peça, cosa que ajuda a visualitzar amb molt més detall les zones conflictives i estalviar càlculs innecessaris allà on no hi passa res, algunes d'aquestes tècniques es basen en quadrees (dues dimensions) i octrees (tres dimensions) aplicats als elements finits⁹¹, altres es basen en mètodes de subdivisió de triangles per a subdivisions irregulars o en mètodes combinats⁹². Com en molts altres casos la simulació pot ser bidimensional o tridimensional i això canvia en gran mesura la precisió i el temps requerit per l'obtenció dels resultats, sent els càlculs tridimensionals molt més complexos i costosos. Aquesta tècnica és quasi exclusivament emprada en càlculs d'alta precisió i per tant generalment no es fa servir en programes que hagin de mantenir una relació en temps real amb l'usuari excepte en simulacions de tipus mèdic que es debaten entre els models de "mass-spring"⁹³ i els elements finits⁹⁴. Entre els desavantatges d'aquest mecanisme trobem que el sistema no admet grans deformacions ja que es torna numèricament inestable⁹⁵ ⁹⁶ quan l'objecte canvia notablement la seva forma. Degut a que es basa en el mallat de la peça per fer el càlcul, quan aquesta malla pateix deformacions importants els elements discretitzats comencen a presentar geometries extremes que poden fer perdre eficiència i precisió al sistema, solucionar aquest problema pot ser molt costós a nivell a

90 Knabner, P., Tapp C., Thiele K., "Adaptive finite volume discretization of density driven by flows in porous media", 1997, Transport de contaminants en milieux poreux (support de cours), CEA-EDF-INRIA, p. 322-355

91 J. Bielak, O. Ghattas, E.-J. Kim, "Parallel Octree-Based Finite Element Method for Large-Scale Earthquake Ground Motion Simulation", 2005, *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 10(2):99-112

92 <http://www.cs.rpi.edu/~flaherje/pdf/fea8.pdf>

93 Bourguignon, D., Cani, M.P., "Controlling anisotropy in mass-spring systems", August 2000, *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS)*, page 113--123

94 Bro-Nielsen, M., Cotin, S., "Real-time Volumetric Deformable Models for Surgery Simulation using Finite Elements and Condensation", 1996, *EUROGRAPHICS '96* / J. Rossignac and F. Sillion (Guest Editors), Blackwell Publishers, Volume 15, Number 3, c-57 - c-66

95 Irving, G., Teran, J., Fedkiw, R., "Invertible Finite Elements For Robust Simulation of large deformation", 2004, SCA '04 *Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* Pages 131-140 **Introduction**

96 Kilian, A., Ochsendorf, J., "Particle-spring systems for structural form finding", 2005, *Journal of the international association for shell and spatial structures* (J. IASS), Vol. 46 No. 2 August n. 148, P. 77-84 **Intorduction**

computació ja que cal refer la malla i aquest procés acostuma ser molt lent. Un altre desavantatge del sistema és que per donar lloc a simulacions vàlides calen càlculs que acostumen a ser lents i complexos per tant necessita molt de temps de càlcul si en volem obtenir resultats vàlids.

Un exemple molt conegut d'aquestes simulacions són les recreacions digitals col·lisions entre vehicles en les quals podem apreciar la deformació i trencament de les diferents peces amb tota mena de detalls. Aquestes simulacions han permès un gran estalvi de material en fer-se innecessari el crear prototips reals per després destruir-los. També casos molt més complexos com impactes d'avió contra centrals nuclears o contra edificis han estat simulats amb èxit ja ha partir de mitjans dels anys setanta⁹⁷. D'aquesta manera situacions que abans no es podien comprovar amb prototips si no era amb un cost molt elevat ara es podien repetir tants cops com fes falta amb dades completament precises. A internet podem trobar múltiples exemples de simulacions d'aquest tipus sent potser l'exemple més interessant la simulació de l'impacte dels avions a les torres bessones o les col·lisions entre vehicles, les quals ofereixen tota mena de detalls sobre els fets.

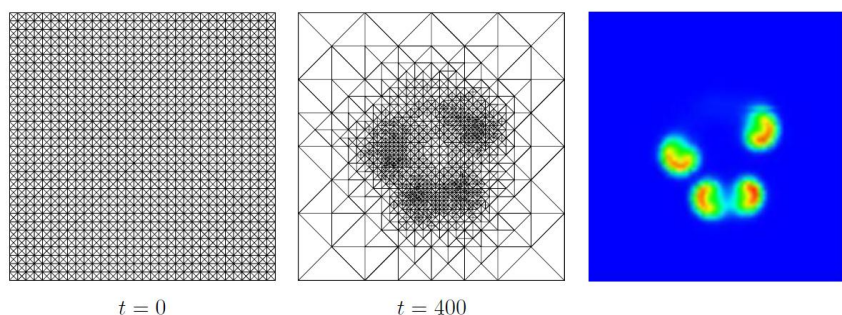


Fig 15. Exemple de malla adaptativa en diferents temps de la simulació. En el primer cas (esquerra) és temps 0 i per tant encara no s'ha redistribuït la densitat. En el segon cas (mig i dreta) el càlcul ha avançat i ja s'han produït àrees de més tensió que d'altres de manera que la malla s'ha redistribuït per adaptar-se amb més precisió.

Actualment hi ha un cert debat al voltant de quin sistema és millor per a la simulació de sòlids, si el mass-spring o els elements finits ja que a causa de l'augment de la potència en els ordinadors la possibilitat de fer servir sistemes d'elements finits en temps real ha crescut considerablement en oferir simulacions de més realisme i detall que els sistemes de partícules o de "mass-spring". Sembla però que últimament la tendència va més en la direcció dels sistemes de partícules que no pas en la dels elements finits ja que són més versàtils i permeten englobar més fenòmens amb una única tècnica relativament senzilla que a més pot actuar en temps real. Per exemple hi ha autors com Mathias Müller que té articles del 2002 parlant de possibles aplicacions dels

⁹⁷ Degen, P., Furrer, H., Jemielewski J., "Structural analysis and design of a nuclear power plant building for aircraft crash effects", 1976 *Nuclear*

Engineering and Design Volume 37, Issue 2, May 1976, Pages 249-268

sistemes FEM (Finite element method) en temps real⁹⁸ però que actualment està treballant en simulacions de partícules tal com demostren els seus últims articles sobretot dedicats a l'àrea dels video-jocs. Precisament aquesta indústria és la que està mantenint en gran mesura aquestes investigacions per tant és lògic que a tendència sigui a evolucionar cap als interessos d'aquest sector que busca un sistema unificat de simulació global de menor precisió i major versatilitat més que no pas a un sistema particular de precisió.

2.3.8 Càlcul de volums finits ^{99 100}

En el càlcul de volums finits el plantejament és similar al cas anterior però ja no es discretitza el model d'anàlisi sinó l'espai que el conté. Per aquest sistema ens cal considerar una espai finit que anomenarem domini i que subdividirem en diferents zones cosa que normalment es fa a través d'una malla que representa el volum discretitzat. A diferència dels sistemes de partícules no tenim elements puntuals que es desplacin de posició sinó que hem de treballar amb fluxos que es desplacen entre les cel·les de l'espai discretitzat. Amb aquest mètode es pot simular el comportament d'elements amorfs sense una estructura definida com seria el cas d'un element amorf de manera que tenen aplicació immediata a la mecànica de fluids en enginyeria o en problemes de transferència de calor i altres camps. Un aspecte essencials del sistema de volums finits és la conservació de les propietats de manera que el sistema sigui conservatiu. Per a complir aquesta propietat cal que el guany o pèrdua d'una cel·la sempre impliqui una pèrdua o guany equivalent per alguna de les cel·les contigües a aquesta. Si aquests canvis es fan de manera equilibrada, fent que el que entra en un espai es correspongui sempre amb el que en surt d'un altre, tot el sistema es torna conservatiu per tant cal assegurar que les fórmules de cada cel·la siguin conservatives tant en la massa com en l'energia, el moment, etc. Les formulacions de flux que regulen aquest intercanvi de propietats han de donar-se de manera ordenada seguint el comportament real dels fluids i per això cal tenir en compte la geometria de la malla i les àrees que considerem per a cada node de la mateixa. En el cas de malles triangulars l'espai assignat a cada node pot seguir diverses estratègies ^{101 102} i a partir d'aquest s'assigna un volum a cada

⁹⁸ Muller, M., Dorsey, J., McMillan, L., Jagnow, R., Cutler, B., "Stable Real-Time Deformations", 2002, Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, Pages 49-54

⁹⁹ Eymard, R., Gallouet, T., Herbin, R., "Finite Volume Methods", 2000, *Handbook for Numerical Analysis*, Ph. Ciarlet J.L. Lions eds, North Holland, 2000, 715-1022

¹⁰⁰ http://cfd.mace.manchester.ac.uk/twiki/pub/Main/TimCraftNotes_All_Access/ms4-fvreview.pdf

¹⁰¹ Eymard, R., Gallouet, T., Herbin, R., "Finite Volume Methods", 2000, *Handbook for Numerical Analysis*, Ph. Ciarlet J.L. Lions eds, North Holland, 2000, 715-1022 - **3.4.2 Classical finite volumes on a dual mesh**

node. Un procés similar es fa servir en el cas de malles quadrades en les quals també trobem estratègies similar de distribució de volums. Les equacions que controlen el flux de valors d'una cel·la a una altra s'anomenen equacions de transport i són les funcions que permeten assegurar que el sistema sigui conservatiu, així segons la configuració de la malla calen unes equacions de transport diferents per traslladar les propietats. En general s'ha treballat amb malles triangulars o rectangulars però actualment ja fa temps que s'estan provant malles irregulars de manera que les equacions de transport puguin assegurar que el sistema sigui conservatiu. Actualment es fan servir sistemes de malles adaptatives¹⁰³ que afegeixen més precisió allà on hi ha més concurrència de forces i densitats, aquest recurs ja hem vist que també es fa servir en el cas de la simulació d'elements finits i en general és necessari quan la distribució de les propietats no és uniforme, produint-se punts d'alta densitat en el model.

Una de les primeres limitacions que presenta aquest sistema és que la convergència a una solució es propaga de manera proporcional al diàmetre de les cel·les que conformen la malla¹⁰⁴ ja que el flux es mourà a un nombre limitat de particions a cada iteració de manera que el sistema presenta el que s'anomena "convergence rate" que dependrà de la quantitat de divisions que fem servir i com més divisions mes tardarà el sistema no només a calcular cada iteració sinó a fer convergir tot el conjunt. Per altra banda, des del punt de vista dels CAD o dels jocs hi ha una limitació important i és que el volum considerat per a la simulació és necessàriament limitat¹⁰⁵ de manera que no es pot aplicar de manera general a un espai il·limitat sinó de forma particular a una zona limitada. Tot plegat fa que sigui una estratègia aplicable a casos concrets però que difícilment pot utilitzar-se com un sistema general al no gaudir de la llibertat de moviments que observem en els sistemes de partícules on la posició només queda limitada pel límit de precisió numèric del sistema.

2.3.8.1 *Navier Strokes*

En relació al sistema de volums finits trobem els "Navier-Stokes" com un mecanisme essencial per a la simulació de fluids. Aquests sistema es basa en descriure la velocitat d'un fluid en un punt, d'aquesta manera tenint en compte la viscositat, resistència i altres factors es poden

¹⁰² <http://users.led-inc.eu/~phk/mesh-dualmesh.html>

¹⁰³ Berger, M. J., Olinger, J., "Adaptive mesh refinement for hyperbolic partial differential equations" 1984 *Journal of Computational Physics* Volume 53, Issue 3, pp. 484-512

¹⁰⁴ Cai, Z., Douglas, J., Park, M., "Development and analysis of higher order finite volume methods over rectangles for elliptic equations", 2003, *Advances in Computational Mathematics* 19: 3-33, 2003 - **Introduction**

¹⁰⁵ GPU Gems 3, PART V: Physics simulation - **Chapter 30. Real-Time Simulation and Rendering of 3D Fluids**

descriure vectors que indiquen quin és el moviment del fluid en un punt determinat. Aplicat al sistema de volums finits obtenim equacions diferencials que permeten posar en relació les diferents propietats d'un fluid en moviment siguin aquestes la distribució de velocitats, la temperatura, la pressió o la densitat. Amb aquest mecanisme podem obtenir una aproximació de les diferents direccions que prenen les partícules quan aquestes es desplacen per un circuit. Aquest sistema a més permet la simulació de remolins i fenòmens complexos propis dels fluids que són molt difícils de simular per altres mètodes a partir de les equacions de Reynolds-averaged Navier-Stokes. Entre les propietats més interessants d'aquest sistema està el fet que es tracta d'una estratègia compatible tant amb sistemes de partícules ¹⁰⁶ ¹⁰⁷ com amb sistemes finits ¹⁰⁸.

2.3.8.2 "Smoke in a box" ¹⁰⁹

Un exemple d'aplicació dels sistemes esmentats el trobem en la següent demostració on es treballa el tema dels fluids compressibles o gasos. Aquest és una tècnica desenvolupada per NVIDIA corporation que fabrica targetes gràfiques i que té com a principal client el fabricant de jocs, a causa d'això comença a interessar-se per l'adaptació de sistemes de simulació de fenòmens físics al món dels video-jocs fent que aquests es puguin calcular des de la targeta gràfica. Per poder actuar en temps real els algorismes han de ser simplificats al màxim sense perdre realisme visual i això implica modificacions importants en les fórmules i el plantejament. Un dels primers punts que es defensen per justificar l'ús d'aquest sistema és que tot i que els sistemes de partícules també poden imitar fluids requereixen de grans quantitats de càlculs per fer-ho de manera versemblant i en alguns casos cal visualitzar els resultats en temps real perquè donin l'aparença d'un fluid. Per altra banda hi ha alguns efectes que amb partícules són difícils de simular com és el cas dels remolins. És per això pel que algunes aproximacions en temps real han optat per fer servir malles fixes similars a les observades en el cas dels volums finits però dedicades a la simulació de gasos.

¹⁰⁶ Martin, D. F., Colella, P., Keen, N. D., "An Incompressible Navier-Stokes with Particles Algorithm and Parallel Implementation", 2005, Parallel Computational Fluid Dynamics: Theory and Applications, *Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics*, Elsevier, p. 461-468.

¹⁰⁷ Müller, M., Solenthaler, B., Keiser, R., Gross, M., "Particle-based fluid-fluid interaction", 2005, Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pp. 237-244

¹⁰⁸ <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/nseqs.html>

¹⁰⁹ GPU Gems 3, PART V: Physics simulation - **Chapter 30. Real-Time Simulation and Rendering of 3D Fluids**

En realitat el següent cas es basa en els "Navier strokes" que també és fan servir en càlculs de tipus científic, però que aquí han estat considerablement simplificats per donar lloc a un càlcul eficient sobre la base d'un sistema de volums finits. El funcionament bàsic consisteix en generar una malla de vectors que descriuen la velocitat i la direcció del fluid en aquell punt, aquesta varia segons la densitat, la pressió, la temperatura i altres factors. Cada Cel·la de l'espai discretitzat es comunica amb les del seu entorn de manera que segons l'estat de cada cel·la canvien els vectors de les cel·les circumdants simulant així el moviment de fluids al llarg de tot el volum estudiat. El subjecte del moviment poden ser partícules que van seguint les influències dels vectors que estan al seu entorn o bé poden ser densitats que es transmeten de cel·la en cel·la segons els vectors també¹¹⁰. Tot i que és millor simular un gas amb densitats que amb partícules, aquest mecanisme també presenta alguns desavantatges ja que en aquest cas el contacte entre sòlids i fluids no es pot simplificar com un càlcul de col·lisió entre partícules perquè no estem fent servir un model de partícules per simular el fluid sinó un model de discretització volumètrica basat en densitats.

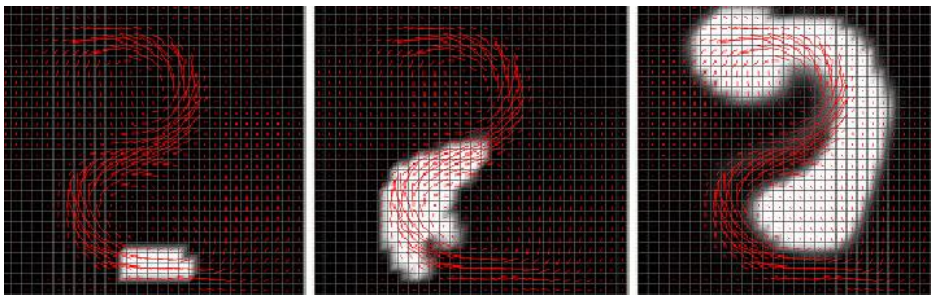


Fig 16. Exemple del sistema de "Navier strokes" aplicat al moviment d'un fluid definit per diferents densitats en una malla.

També necessitarem computar el contacte entre el gas i un sòlid, i a més necessitarem no només definir on es toquen a través de la malla, sinó quina influència té el moviment del sòlid amb els vectors de moviment de la malla. Per a resoldre aquest problema s'haurà de computar quines cel·les estan dins del volum del sòlid i com el moviment del sòlid en aquell punt afecta a les cel·les circumdants, aquest procés es farà a través del que s'anomena "voxeliazation" ¹¹¹ en el qual es transforma un sòlid en una malla tridimensional de cel·les que n'aproximen el volum a partir de considerar que algunes estan plenes i altres buides de manera que podem saber on és l'interior i l'exterior de l'element. Amb aquest mètode es pot posar en contacte el sòlid amb el sistema de volums finits que simula el gas de manera que es pot calcular la força que transmet el sòlid amb el seu moviment al gas a través de la cel·la. D'aquesta manera la presència i el moviment del sòlid pot ser tinguda en compte en la computació del fluid que es mou a través de la malla. Una altre cas que pot sorgir és el contacte entre un líquid i un gas. En aquests casos la

¹¹⁰ Stam, J., "Real-time fluid dynamics for games", March 2003, *Proceedings of the Game Developer Conference*, **Pag 2**

¹¹¹ <http://labs.cs.sunysb.edu/labs/projects/volume/Papers/Voxel/index.html>

discretització volumètrica permet tractar el tema amb facilitat a causa de que poden relacionar-se a través de la mateixa malla. Però cal tenir en compte que en el cas dels gasos el que es representa és la densitat d'aquest a l'espai, corresponent una major densitat a una major opacitat, sense que per això tinguin un contorn massa definit. En el cas de l'aigua, en tenir volum constant, no es pot representar com una diferència de densitats sinó que més aviat és un treball visual on el més important es trobar el contorn d'un cos amorf. Aquestes casuístiques però corresponen més aviat a temes visuals que estrictament físics.

2.3.9 Models de partícules ¹¹²

El sistema de partícules és potser el model més elemental tant a nivell conceptual com de programació que podem trobar-nos en el món de les simulacions físiques digitals. Mostra d'això n'és el fet de que ha tingut un ús molt generalitzat ^{113 114 115} tant a nivell científic com gràfic a causa de que és relativament senzill de programar i manipular per a nombres relativament elevats de partícules fins i tot en temps real. Si fins ara hem vist dos mètodes de discretització basats en dividir o bé els sòlids en parts més senzilles o bé l'espai en petits volums, en el cas dels sistemes de partícules els elements a considerar són únicament partícules esfèriques. A diferència dels sistemes d'elements finits aquí no considerarem un polígon massís com a part d'un sòlid sinó que en el cas més bàsic del sistema de partícules anomenat "Hard Spheres" considerarem com a massís l'espai que correspon a una esfera situada en un punt determinat de l'espai. Aquesta esfera acostuma a estar definida per una posició X Y Z, un vector de velocitat i un radi. Quan dos o més esferes interaccionen entre elles es genera una dinàmica de grup en la qual els elements s'influencien els uns als altres en trajectòries que generalment no poden ser computades per càlculs directes quan la interacció implica més de dues partícules. Aquest problema ha estat anomenat com "N-body problem"¹¹⁶ i a diferència dels sistemes d'elements i volums finits que podien optar per fórmules directes o diferencials segons el cas, en el cas dels sistemes de partícules, per a casos de 3 o més elements, només es poden resoldre de forma general per equacions diferencials en les quals el factor de discretització acostuma a ser el

¹¹² Hoggie, d., "The Classical Gravitational N-Body Problem" 2005, arXiv:astro-ph/0503600

¹¹³ Koumoutsakos, P., Cottet, G.H., Rossinelli, D., "Flow simulations using particles bridging Computer Graphics and CFD", 2008, SIGGRAPH '08 ACM SIGGRAPH 2008 classes, Art. nº 25.

¹¹⁴ Auer, S. *Realtime particle-based fluid simulation* 2010 Technische Universität München

¹¹⁵ Kilian, A., Ochsendorf, J., "Particle-spring systems for structural form finding", 2005, *Journal of the international association for shell and spatial structures* (J. IASS), Vol. 46 No. 2 August n. 148, P. 77-84 **Introduction**

¹¹⁶ http://en.wikipedia.org/wiki/N-body_problem

temps. Així, doncs, la precisió del resultat dependrà de l'interval de temps considerat, com més petit sigui aquest més precisió tindrà el simulador però més passos necessitarem per arribar a un temps determinat. Un cop el model es posa en marxa la velocitat s'anirà sumant a la posició de cada partícula, i l'acceleració a la velocitat, per cada interval de temps considerat. La massa regularà la interacció entre les partícules donant més inèrcia als cossos que tinguin més massa. Un clàssic d'aquesta mena de simulacions consisteix en representar les òrbites de diversos cossos quan s'atrauen per mitja de forces gravitatòries ¹¹⁷ i de fet el "N-body problem" està plantejat per aquests casos. Gràcies, doncs, al seu plantejament es poden simular amb molta facilitat les òrbites dels planetes i interaccions entre molts cossos de forma simultània que han portat a ser molt utilitzat també en la simulació de fluids tal com veurem mes endavant.

2.3.9.1 *Tècniques generals d'optimització*

Un dels grans inconvenients d'aquest sistema és que requereix un augment exponencial de càlculs per a un creixement lineal del nombre de partícules quan aquestes han de relacionar-se entre elles. La causa d'aquest problema el troben en el fet de que si volem saber si una partícula ha entrat en contacte amb alguna altra del conjunt no tenim més remei que operar la partícula amb el conjunt sencer i detectar si hi ha alguna que la toqui o no. Aquest càlcul s'ha de repetir per cada partícula de manera que si tenim N elements, aquest sistema ens obliga a fer $N \times N$ càlculs. Alguns mètodes d'optimització han optat per distribuir els elements d'estudi per zones a l'espai formant el que s'anomena "octrees" o divisions de l'espai en cubs que al seu torn es van subdividint en 8 parts cubs iguals de manera que els càlculs per les col·lisions es poden optimitzar considerablement ^{118 119}. Si fins ara es necessitava calcular la distància de totes les partícules entre elles per saber quines es toquen i quines no, amb un càlcul distribuït per zones es pot reduir aquesta comprovació a les partícules de la mateixa zona de manera que si per exemple estem calculant les relacions de 100 partícules, i no distribuïm per zones, ens cal efectuar 100 càlculs per cada partícula per saber si aquesta en toca alguna o no, o sigui 100 x 100 càlculs per cada lapse de temps considerat. En distribuir per zones (per exemple en un malla de 2x2x2 zones) el nombre de càlculs per partícula baixa fins a N/8 (de mitja) que serien 12 (depenent de la distribució de les partícules) i per tant només calen 12 x 100 càlculs per lapse de

¹¹⁷ McCandlish, D., "Solution to the three body problem by computer", 1973, *American journal of physics*

¹¹⁸ GPU Gems 3, PART V: Physics simulation - **Chapter 31. Fast N-Body Simulation with CUDA**

¹¹⁹ Esward, J., Swam, L., "Fast Collision Detection with an N-Objects Octree", August 1994 *CiteSeer Computer and Information Science Publications collection*

temps per detectar col·lisions. Tot i que cal tenir en compte alguns aspectes en la frontera entre zones en general aquest concepte accelera considerablement el càlcul de sistemes de partícules.

2.3.9.2 *Hard spheres:*

En els càlculs de tipus científic es coneix el model de "Hard spheres" com un cas particular del model de partícules en el qual es considera que cada partícula és una esfera impenetrable de radi determinat que no pot ser travessada. A partir d'aquí es considera que no actua cap força en les partícules excepte aquella derivada del xocs que es produeixen entre elles. Mentrestant es considera que es mouen en moviment rectilini uniforme¹²⁰. A nivell de programació es computen una sèrie de fórmules per calcular el moviment en petites fraccions de temps i es comproven les distàncies i les col·lisions per cada nova posició. Com que aquest esquema pot donar lloc a conflictes (errors de detecció) quan les velocitats són desproporcionadament superiors als radis, altres plantejaments calculen les col·lisions per mitja de fórmules, de manera que el càlcul es torna molt més precís¹²¹. En simulacions d'impacte entre molècules s'ha fet servir aquest mecanisme que pot actuar en una, dues o tres dimensions. Si es tracta d'una dimensió s'anomena "Hard rod", si en dues "Hard disc" ¹²². Tal com veiem és un sistema bàsic, basat en l'aplicació directa del model de partícules i permet la recreació d'interaccions entre milions d'elements perfectament esfèrics.

2.3.9.3 *Mass-spring models*

Aquest sistema és un derivat del sistema de partícules que basa la seva estratègia en generar relacions de distància entre parells de punts de manera que es mantingui la seva distància fixa. La força que uneix les partícules pot ser entesa com una molla que relaciona les seves posicions generant una força d'atracció o repulsió que compensi l'augment o disminució de distància entre elles i que sigui proporcional a l'increment d'aquesta. Normalment aquesta reacció segueix les lleis de l'elasticitat de Hooke les quals regulen les reaccions en funció de la distància i a partir d'aquest principi es poden construir estructures de barres amb les es podran simular des de sòlids rígids, fins a peces de roba, teixits orgànics, etc. Una de les característiques d'aquest mètode és que permet simular el comportament de materials complexos que responen de

¹²⁰ Fosdick, LI., "Molecular dynamics: Introduction", January 19, 1995, *HPSC Course notes*, University of Colorado,

¹²¹ <http://introcs.cs.princeton.edu/java/assignments/collisions.html>

¹²² Fosdick, LI., "Molecular dynamics: Introduction", January 19, 1995, *HPSC Course notes*, University of Colorado,

manera diferent segons la direcció de les tensions internes com és el cas de molts teixits orgànics ¹²³. Aquesta capacitat per simular el comportament anisotròpic depèn de la longitud de les barres i de la disposició que segueixin en el model de manera que amb el mateix sistema i només canviant la disposició dels elements podem simular tota mena de comportaments sense afegir codi de programació ni canviar l'estructura del programa. Tot i això el sistema també presenta limitacions importants com per exemple la incapacitat simular fenòmens de deformació associats a les accions tangencials a la direcció de la barra com el pandeig. Com que aquests fenòmens són necessaris per a oferir un resultat realista en la simulació de roba, que és una de les principals línies d'investigació en aquest camp, s'han proposat algunes solucions que permeten simular fenòmens de pandeig ¹²⁴. Altres problemes d'aquest sistema neixen del fet que no manté el volum constant quan es deforma però de nou s'han elaborat tècniques per fer que aquesta propietat es retengui sense augments significatius de codi o temps de càlcul ¹²⁵, per a fer possible la simulació d'òrgans i teixits biològics de volum constant ^{126 127}.

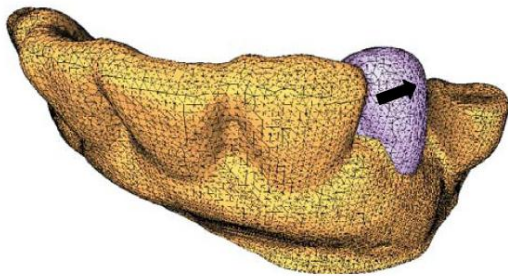


Fig 17. Exemple de model tridimensional d'una mandíbula compost de barres en el qual es pretenia simular la inflamació d'una geniva amb un sistema de mass-spring.

En arquitectura la major part de les aplicacions que hem presentat es basen en aquesta estratègia o en casos similars per manipular malles com per exemple CADenary tools, Kangaroo o els sistemes de force-density, que si bé no són sistemes de simulació física pròpiament dits, si que fan servir una aproximació molt similar a l'exposada en els models de barres entre partícules. També cal afegir que el fet d'aplicar malles a la resolució de problemes arquitectònics entronca

123 Bourguignon, D., Cani, M.P., "Controlling anisotropy in mass-spring systems", August 2000 Eurographics *Workshop on Computer Animation and Simulation* (EGCAS), page 113–123

124 Choi, K.J. Ko, H.S., "Stable but Responsive Cloth", 2005, SIGGRAPH '05 *ACM SIGGRAPH 2005 Courses*, Article No. 1

125 Lee, Y., Terzopoulos, D., Waters, K., "Realistic modeling for facial animation" SIGGRAPH '95 *Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques* Pages 55 - 62

126 Marchal, M., Promayon E., Troccaz, J., "Simulating complex organ interactions: evaluation of a soft tissue discrete model", December 2005, *Proceedings of International Symposium on Visual Computing. Lecture Notes in Computer Science 3804*. Ed. George Bebis et al., pp.175-182

127 Phannurat, P., Tharanon, W., Sinthanayothin, C., "Simulation of elastic soft tissue deformation in orthodontics by mass-spring system", 11 nov. 2008, *3rd International Symposium on Biomedical Engineering ISBME* pp. 247-251

amb una tradició que ha vam observar en el cas de Gaudí quan plantejava el sistema de pesos aplicats sobre teixits a l'hora de donar forma les voltes o de Frei Otto en treballar amb les superfícies mínimes obtingudes amb bombolles de sabó. Aquest mecanisme com ja hem vist ha trobat aplicació en una gran varietat d'àmbits que fan d'ell un sistema tant eficient com versàtil, capaç d'admetre tota mena de deformacions i que s'està demostrant extremadament capaç d'introduir-se en quasi tots els àmbits de les simulacions.

2.3.9.4 Exemple de simulació de sòlid rígid amb partícules ¹²⁸

Per simular un sòlid rígid ens cal tenir en compte dos apartats, el primer és el moviment del sòlid sobre si mateix, ja sigui translació o rotació, això es resol amb fórmules bàsiques del moviment rectilini uniformement accelerat i fórmules de gir angular. La translació es comportarà de manera molt similar a la d'una partícula, a partir de la posició del centre de masses s'aplicarà una velocitat i una acceleració amb les quals el sòlid canviarà la seva posició. Caldrà tenir en compte la massa d'aquest per poder-lo operar i sobretot perquè es pugui relacionar amb altres objectes del seu entorn. Similarment la rotació de la geometria es produirà a partir del centre de masses amb una posició i velocitat angular determinada que s'actualitzaran per cada interval de temps considerat. Fins aquí els càlculs són relativament senzills. El segon cas que cal resoldre són les interaccions amb altres sòlids en les quals es produeixin rebots que com veurem requereixen una estratègia més afinada. Operar cada cara d'un sòlid i veure si es toca amb les cares d'altres sòlids són operacions costoses per a la computadora que augmenten exponencialment el temps de càlcul. A causa d'això no es poden fer servir en jocs o en altres simulacions que necessiten operar-se en temps real. Per solucionar aquest problema i donar un aspecte de realisme molt elevat calen aproximacions que siguin més senzilles de programar i sobretot molt més eficients de calcular.

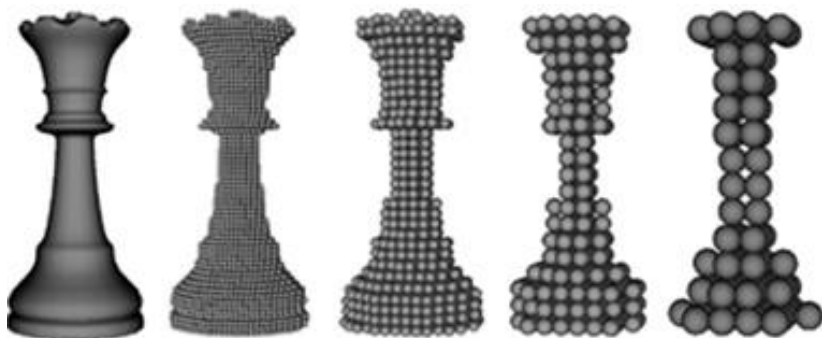


Fig 18. Exemple d'aproximació a una forma sinuosa a partir de partícules esfèriques. Com veiem un menor radi de les partícules implica més precisió en la forma però un major nombre de partícules i per tant un major nombre de càlculs.

128 GPU Gems 3, PART V: Physics simulation

L'estratègia que exposo a continuació és una manera de generar una malla tridimensional de partícules perfectament esfèriques que aproximïn el volum intern del sòlid de manera que els fenòmens de col·lisió quedin reduïts a la repetició d'una operació senzilla de distància entre radis. El càlcul per disposar les partícules esfèriques s'ha de realitzar només un cop al principi de l'execució del programa, ja que, si no canvia la forma de l'objecte, no cal tornar a fer tota la malla de partícules cada cop que operem. Per generar el conjunt de partícules que descriuran l'objecte es genera una malla en tres dimensions que contingui l'element a discretitzar com si fos un sistema de volums finits. En aquesta malla es situa una partícula en aquells punts que es considerin interiors. Per saber si un punt és interior o no es fa servir una tècnica anomenada "depth peeling"¹²⁹. Originalment aquest sistema consisteix en calcular la intersecció entre un raig visual i les cares de la figura. Amb aquesta tècnica es detecta quin és el punt més proper de la figura al observador seguint el raig visual i per tant permet saber quins elements seran vistos i quins ocults. Un desenvolupament d'aquesta tècnica va permetre fer el càlcul invers de manera que podem calcular la intersecció més llunyana entre un raig visual i la figura. Combinant totes dues tècniques obtenim les profunditats màxima i mínima de l'objecte des del punt de vista de l'observador i com que es pot repetir el càlcul dins d'aquests marges es pot anar obtenint la profunditat de les cares que hagin pogut quedar entre el punt més proper i el més llunyà

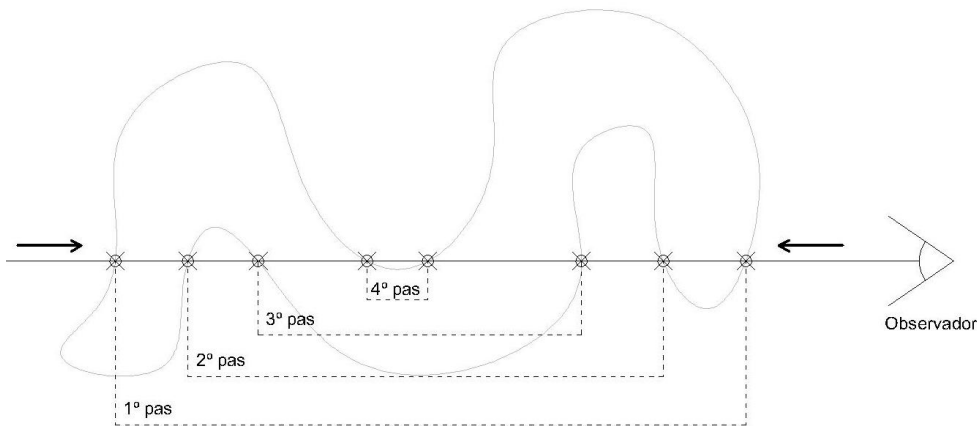


Fig 19. Esquema que descriu el procés de càlcul de "depth peeling", amb el que obtenim les profunditats de les diferents cares d'un cos i amb el que es pot discriminar quins punts són intern i quins externs.

En general aquesta tècnica s'ha fet servir per a problemes complexos de transparències però en aquest cas l'han aprofitat per discriminar quines cel·les són interiors al volum i quines són exteriors, amb un mecanisme que originalment estava dedicat als gràfics. Volem recalcar la

¹²⁹ http://developer.download.nvidia.com/SDK/10/opengl/src/dual_depth_peeling/doc/DualDepthPeeling.pdf

diferència de plantejament que hi ha entre les simulacions científiques i les aproximacions que fan servir qualsevol recurs per tal d'accelerar el càlcul dels processos físics. Un cop fet això podem fer servir les dades de profunditat de les cares per saber quines cel·les són interiors i quines exteriors. Un avantatge fonamental d'aquest mecanisme és que podem controlar fàcilment el grau de resolució del sòlid augmentant la definició de la malla de manera que s'obté una col·lisió més acurada perquè augmenta el nombre de partícules i disminueix el radi d'aquestes. Altres avantatges d'aquesta aproximació a la col·lisió és que es pot integrar amb simulacions de fluids basades en sistemes de partícules¹³⁰ de manera que podem tenir un motor eficient de càlcul que ens abrasi tota mena de casuístiques entre sòlids i fluids de manera prou convincent a l'ull humà i amb una programació relativament senzilla.

2.3.9.5 Exemple de detecció de la col·lisió per a sòlids¹³¹

La col·lisió de dos objectes sòlids acostuma a seguir tres fases, una primera de detecció de possibles casos de col·lisió, una segona on s'avalua el contacte entre els cossos que entren en col·lisió obtenint els punts de contacte i finalment la tercera fase és on es computa la força de rebot entre aquests elements. El moviment del cos es calcula per intervals de temps on es realitza un càlcul que pot ser continu o discret. En el cas de càlculs de tipus discret el que es fa és fer saltar el sòlid de posició en posició per petits intervals de temps, de manera que no recorre tots els punts del recorregut sinó només uns quants. Aquest càlcul no és capaç de determinar el punt exacte de contacte ja que el sòlid no es mou de manera contínua sinó discontinua, de manera que la valuació de la col·lisió es produeix per un instant determinat que rarament coincidirà amb l'instant exacte de contacte entre els dos sòlids.

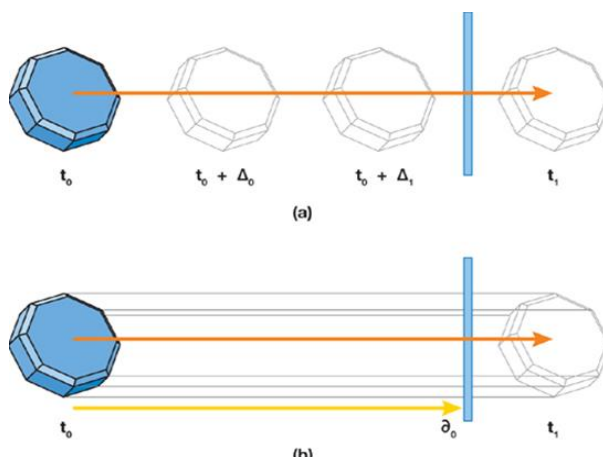


Fig 20. Com veiem a la figura en el càlcul discret es pot perdre el contacte amb un element, mentre que en el sistema continu no, però això és a costa d'un major temps de computació. De nou ens trobem amb el dilema entre el realisme i l'eficiència del càlcul.

130 GPU Gems 3, PART V: Physics simulation **Chapter 29.3.3**

131 GPU Gems 3, PART V: Physics simulation **Chapter 29 - 33**

Aquest problema pot implicar que el sistema deixi de detectar col·lisions quan el cos es mou a molta velocitat i per tant els errors amb sistemes discrets són molt grans. En el cas de funcions de tipus continu el sistema avalua el recorregut complet per un interval que va de t^0 a t^1 tenint en compte el desplaçament en aquest mateix interval. No hi ha una sola formula global que permeti trobar el contacte per aquests casos i es fan servir sistemes recursius basats en polinomis per trobar el punt d'impacte. Val a dir que són uns sistemes més lents que els sistemes discrets però asseguruen que mai es perd el contacte entre elements.

2.3.10 Simulacions de fluids amb partícules

Ja hem vist diversos casos concrets d'aplicació del model de partícules en els quals amb diferents variacions sobre el mateix esquema es poden simular aspectes relativament complexos del comportament físic dels objectes. El més important és veure que un sistema extremadament versàtil, del que s'han fet infinitud de variants, es pot anar adaptant a nous casos per resoldre problemes complexos i sobretot posar-los en relació entre ells de cara a confeccionar un simulador universal. La tendència natural en intentar simular fluids és a treballar amb sistemes de volums finits perquè no fixen la forma dels elements. Però a continuació veurem una estratègia que simula amb un cert grau de realisme els fluids a partir d'una nova variant del model de partícules. Cal tenir en compte que tractar els fluids amb aquesta aproximació aporta un seguit d'avantatges sobre el model de volums finits que són molt importants, per exemple no hi ha límit espacial a la simulació, els càlculs són més senzills, la malla no afecta a la distribució del fluid i sembla que es pot reconstruir la superfície del fluid partint d'un model de partícules ¹³².

2.3.10.1 *Smooth particles hydrodynamics (SPH)*

Aquesta és una derivació del model de partícules que permet aproximar el comportament d'un gas distribuït de manera no uniforme¹³³ ¹³⁴. Les aproximacions basades en el càlcul d'elements finits o de volums finits es basen en la subdivisió d'un element total per a simplificar el seu càlcul, a causa d'això acostumen a perdre definició quan es produeixen concentracions puntuals de

¹³² Auer, S. *Realtime particle-based fluid simulation* 2010 Technische Universität München

¹³³ <http://www.mpia-hd.mpg.de/homes/dullemon/lectures/fluidynamics/> **Chapter 11**

¹³⁴ Koumoutsakos, P., Cottet, G.H., Rossinelli, D., "Flow simulations using particles bridging Computer Graphics and CFD", 2008, SIGGRAPH '08

ACM SIGGRAPH 2008 classes, Art. nº 25. **chapter 2**

massa o de gas rodejades d'espai buit, ja que necessiten subdividir molt l'espai per poder donar detall a la simulació. El "SPH" té un avantatge sobre aquests dos sistemes pel fet que no perd definició quan es produeixen grans concentracions de fluid en zones concretes perquè treballa amb partícules no amb subdivisions d'un element i per tant no té un grau de definició mínim. Gràcies a això s'ha pogut fer servir en simulacions astrofísiques en les quals es donen fenòmens molt importants de variació de densitats en espais molt grans¹³⁵. En aquest model es considera que el conjunt del fluid està compost per un conjunt de partícules que descriuen l'estat total del fluid tractat i les propietats particulars de cada partícula depenen de la relació que manté amb la resta de partícules de manera que a diferència d'altres sistemes la partícula no té una massa fixada. Quan una de les partícules s'allunya per sobre d'un cert valor deixa d'intervenir en el càlcul del fluid considerat de manera que estalvia processos innecessaris amb efectes menyspreables. Per altra banda, l'estat del fluid en un punt qualsevol s'aproxima interpolant l'estat de les partícules properes¹³⁶. La definició de la superfície del fluid cal derivar-la de la disposició de les partícules que el formen i en general acostuma a ser un procés costós encara que això afecta més als aspectes gràfics que no al càlcul pròpiament dit. L'avantatge d'aquest mètode de computació és que concentra la capacitat de càlcul directament sobre cada unitat de fluid i per tant naturalment opera on hi ha més densitat sense necessitat de generar malles adaptatives que consumeixen molts recursos subdividint-se. Així el càlcul no es dispersa en l'espai buit com passa en altres sistemes basats en malles. En el cas concret de les simulacions astrofísiques¹³⁷ inclou la gravetat entre cadascuna de les partícules com a una força contraposada a la repulsió deguda a la pressió del gas que té lloc quan la massa es concentra a causa de la força de la gravetat. Recordem que cada partícula representa una part de la massa total de gas i per tant la pressió tendeix a desintegrar les acumulacions quan aquestes es formen. La gravetat, que en altres simulacions no cal tenir en compte o simplement es pot simplificar com una força vertical, juga un paper essencial en aquesta mena de models en ser la força que permet que es formin les acumulacions esmentades, gràcies a que el sistema treballa amb partícules la implementació d'aquesta força es simplifica en gran mesura. Entre aquestes partícules es donen fenòmens de transferència de massa, calor i altres propietats, derivant-les de la seva posició i volum. Recordem que en treballar amb fluids aquests també tenen dinàmiques internes que cal poder simular de cara a reproduir convenientment els fenòmens astrofísics, per tant en certa manera seria com una barreja entre un sistema de partícules i un sistema de volums finits.

135 Springel, V., "Smoothed Particle Hydrodynamics in Astrophysics", 2011, *ARA&*, 2010, 48, 391

136 Auer, S. *Realtime particle-based fluid simulation* 2010 Technische Universität München - **Introduction**

137 Auer, S. *Realtime particle-based fluid simulation* 2010 Technische Universität München - **2.3**

Una derivació del SPH, simplificada i adaptada al món gràfic apareix l'any 2003 quan Mathias Müller, David Charypar i Markus Gross presenten l'article titulat "*Particle-Based Fluid Simulation for Interactive Applications*" en el qual es marquen el que seran les línies generals de la simulació de fluids amb partícules en temps real. És tenen en compte els conceptes de viscositat, pressió i tensió superficial ¹³⁸ a l'hora de simular-ne el moviment de manera que s'aconsegueixen efectes molt versemblants per a l'ull humà i que a més poden tenir lloc sense un consum excessiu de recursos ni nombres desorbitats de partícules. Per avaluar la força que actua sobre la partícula ens cal conèixer la densitat, la pressió i la viscositat i a partir d'aquestes dades que hem de tenir per cada partícula començar a operar amb les partícules veïnes per saber quina serà la força que actua sobre cadascuna. Si bé el càlcul de la pressió i de la viscositat es consideren forces internes a la partícula, en el cas de la tensió superficial es considera una acció externa igual que la gravetat i que dependrà d'altres fluids al seu entorn incloent l'aire¹³⁹. La pressió es troba com a sumatori de les diferències de pressió amb les partícules veïnes de la zona, aquestes operacions tendiran a homogeneïtzar les pressions per a un conjunt determinat de partícules en una zona concreta.

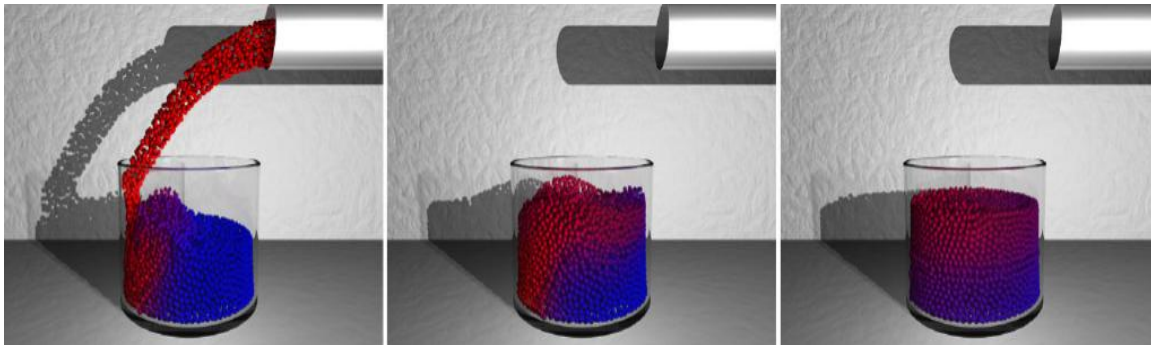


Fig 21. Exemple de partícules simulant la interacció entre dos fluids.

En el cas de la viscositat el càlcul es realitza de manera diferent, es considera que és una força que llima les diferències de velocitat dins del conjunt de partícules considerades de manera que totes tendeixen a moure's de la mateixa manera. Aquest mecanisme actua de forma relativa a la velocitat general del conjunt. No canvia el moviment del centre de masses sinó els diferents moviments divergents de cada partícula respecte aquest. Finalment tenim el càlcul de la tensió

¹³⁸ Auer, S. *Realtime particle-based fluid simulation* 2010 Technische Universität München **pag 21 - 23**

¹³⁹ Müller, M., Solenthaler, B., Keiser, R., Gross, M., "Particle-based fluid-fluid interaction", 2005, Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pp. 237-244 **Pag 3**

superficial en el qual es fan servir "*color functions*" o funcions que permeten saber si una partícula pertany al contorn o no a partir de la detecció de canvis bruscos de densitat ¹⁴⁰. Segons els canvis de normal entre partícules veïnes es pot avaluar quina curvatura té el fluid en aquell punt de cara a obtenir força que exercirà la tensió superficial. La tensió superficial actua amb més intensitat com més forta és la curvatura de la superfície i tendeix a homogeneïtzar les imperfeccions d'aquesta. A tot aquest procés cal afegir un sistema de renderitzat que doni un aspecte final de líquid.

2.3.11 Sistemes tàctils o hàptics

De manera breu voldríem fer esment d'una sèrie de mecanismes dedicats a simular la percepció real d'un objecte virtual, especialment en el tacte i la resistència. Aquest sistema s'està fent servir sobretot en el camp de la medicina de cara a poder simular el tacte de diferents parts del cos i a poder simular operacions quirúrgiques de manera virtual ¹⁴¹. Aquestes estratègies requereixen d'un programari capaç de simular les tensions i deformacions d'un objecte elàstic virtual en temps real com si fos un teixit biològic. La part més interessant dels mateixos és que la simulació física es transformarà en forces que l'usuari podrà percebre de manera que s'entén la simulació com una via de comunicació amb la realitat. En aquest punt apareixen una sèrie de necessitats molt similars a les que tenim els arquitectes de cara al disseny perquè si bé per una banda les simulacions han de ser realistes de cara a donar una percepció adequada dels elements simulats, per l'altra cal que aquesta tingui lloc en temps real perquè la reacció l'hem de sentir en temps real. Ja hem vist que els sistemes de "mass-spring" s'han mostrat molt útils en aquesta àrea gràcies a la seva capacitat de simular el comportament dels teixits amb molt realisme a partir d'algorismes senzills basats en els sistemes de partícules. Però com que aquests sistemes no estan exempts de problemes relativament complicats com el de mantenir el volum constant, també s'han plantejat sistemes d'elements finits en temps real ¹⁴² per a simulacions mèdiques.

140 Müller, M., Solenthaler, B., Keiser, R., Gross, M., "Particle-based fluid-fluid interaction", 2005, Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, pp. 237-244 **Pag 4**

141 Daniulaitis, V., Alhalabi, M.O., Kawasaki, H., Tanaka, Y., "Medical palpation of deformable tissue using physics-based model for haptic interface robot" (HIRO), 2004, Intelligent Robots and Systems, (IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on , vol.4, no., pp. 3907-3911 vol.4, 28

142 Bro-Nielsen, M., Cotin, S., "Real-time Volumetric Deformable Models for Surgery Simulation using Finite Elements and Condensation", 1996, EUROGRAPHICS '96 / J. Rossignac and F. Sillion (Guest Editors), Blackwell Publishers, Volume 15, 1996, Number 3, c-57 - c-66

Altres aplicacions dels sistemes hàptics han tingut lloc en la simulació de processos virtuals de muntatge ¹⁴³ on no deixen de suscitar un cert interès com a sistemes que podrien arribar a tenir un paper important de cara al disseny en generalitzar-se els sistemes de realitat augmentada de cara a l'ensenyament.

2.3.12 Conclusió

Podem dir que els sistemes d'elements finits i de volums finits són generalment mecanismes molt adequats per a computacions de tipus científic ja que permeten reduir l'àmbit de treball a zones molt concretes sobre les quals realitzar comprovacions precises del comportament de l'objecte simulat en una situació particular. Quan aquest és el cas es poden fer servir formulacions molt específiques que donen resultats extremadament ajustats a la realitat. Però quan volem generar un sistema que actuï en temps real apareixen tota una sèrie d'inconvenients que dificulten el seu ús a causa de que són mecanismes molt rígids que no permeten afrontar situacions inesperades o extremes i a més no demostren tampoc una capacitat natural per tenir interaccions amb l'usuari. Si ens fixem en l'exemple del "*smoke in a box*" ens trobem en primer lloc que l'espai en el qual es mou el gas és limitat, i en segon lloc que ha de recórrer a tot un procés addicional per posar en relació aquest mecanisme amb la resta d'elements físics del seu entorn, que es basen en estratègies diferents. Per tant ja es pot veure que aquest sistema no és adequat perquè força al programador a introduir una anomalia en el sistema general de simulació en comptes de fer servir un sol sistema unificat com podria ser el sistema de partícules. Això els fa sistemes molt poc aptes de cara al disseny, fora del que serien les comprovacions puntuals d'un model, i no són per tant mecanismes que ens serveixin en el sentit que feien servir Gaudí o Frei Otto els models físics per obtenir i experimentar amb formes perquè els manca l'agilitat necessària. Aquests sistemes a més requereixen de molts coneixements tècnics de cara a interpretar-los i utilitzar-los correctament de manera que no tenen un ús intuïtiu. Si bé en els jocs d'ordinador aquest aspecte no és important, en el camp del disseny en arquitectura sí que és necessari que l'usuari entengui el funcionament del mateix de cara actuar amb propietat i a controlar el sistema. Per tant no ens semblen aptes per a les fases de disseny inicials en les quals cal un intercanvi molt fluid i concret de dades entre l'usuari i la màquina per poder prendre les decisions principals del projecte. Així, doncs, es necessita un sistema més senzill, més ambivalent i més intuïtiu per poder plantejar una eina digital de disseny. En el cas dels models de partícules o de sistemes de nodes ens trobem en canvi amb simulacions molt versàtils i que requereixen menys precisió i en les quals es tendeix a fer servir simulacions més genèriques que abracen gran quantitat casos

143 Wang, Y., Jayaram, S., Jayaram, U., "Physically based modeling in virtual assembly", 2001, *the international journal of virtual reality* Vol.5, No.1

amb un mateix esquema molt eficient en temps de computació. Gran part de l'esforç en aquests mètodes són tècniques de "maquillatge" en les quals simulacions relativament simples són revestides amb uns efectes gràfics impressionants. En realitat però es busca únicament l'aparença de realisme i de vegades no se li pot donar cap crèdit real al resultat numèric de la simulació. Però no sempre és aquest el cas ja que molts cops els algorismes que fan servir no deixen de ser simplificacions dels mateixos algorismes que fa servir la ciència però no tenint en compte alguna casuística específica o bé reduint la precisió del resultat. En aquests casos potser que la simulació sigui tant visualment atractiva com precisa numèricament. En aquest sentit considero aquesta aproximació molt més propera a les necessitats d'un sistema de "form-finding" digital que no els sistemes de precisió emprats per la ciència. En ser sistemes més àgils i amb un feedback natural amb l'usuari permeten que el procés de generació tingui lloc amb més facilitat, a més en aquesta fase de disseny es necessita més una idea aproximada del comportament de les peces que no pas un càlcul precís de les mateixes. Això és pot realitzar fàcilment amb sistemes simplificats de simulació.

2.4 Exemples de mòduls d'animació actuals

Pensar en un urbanista o un arquitecte que pot abocar un flux de partícules com si fos una riuada, o un flux de gent sobre un territori, edifici o qualsevol altre element de disseny apreciament així quin serà el comportament general en cas d'incendi o d'evacuació podria ajudar a millorar els plantejaments en la fase de disseny. Com veurem a continuació ja hi ha mòduls que permeten fer aquesta mena de simulacions en temps real però no s'apliquen al CAD si no que s'estan fent servir en el camp de l'animació¹⁴⁴ o bé per a jocs d'ordinador¹⁴⁵ i per tant son aquestes àrees les que presenten unes tècniques més avançades de simulació. Aquests sistemes es dediquen a reproduir el moviment de cossos obtenint resultats de gran realisme. Gràcies a la introducció de formulacions extrems de la física es pot fer que tot un conjunt d'elements es comporti com un material real simplificant i tornant molt més intuïtiu el procés d'animació amb elements rígids o amorfs. Si visitem les pàgines WEB del mòdul LAGOA¹⁴⁶ o de emFLOCK¹⁴⁷ en veurem alguns exemples on es combina un moviment de gran realisme amb un motor de renderitzat avançat. Però aquests sistemes no estan adaptats a les necessitats de modelatge en CAD que els arquitectes acostumen a necessitar encara que hagin pogut tenir algun ús puntual en aquest

¹⁴⁴ <http://www.physicsbasedanimation.com/>

¹⁴⁵ GPU Gems 3, PART V: Physics simulation

¹⁴⁶ <http://thiagocosta.net/>

¹⁴⁷ <http://www.mootzoid.com/html/XsiCorner/emFlock.html>

sentit ¹⁴⁸ i cal distingir-los dels programes que hem comentat anteriorment en el sentit que no són mecanismes dirigits a la generació d'informació tècnica sinó que es dediquen sobretot a la generació d'informació perceptiva. En aquest sentit "tot s'hi val" si la cosa va ràpid i sembla real. Aquest plantejament dóna molta llibertat al programador i han sorgit estratègies molt creatives i de gran interès que ens poden servir d'inspiració en donar un punt de vista diferent sobre el problema.

2.4.1 Lagoa multiphysics ¹⁴⁹

"Lagoa" és un motor general de simulació de fenòmens físics generat per Thiago Costa, director tècnic de recerca de Ubisoft Digital Arts. El mecanisme està integrat dins el programa "SoftImage" i permet la simulació d'una gran varietat de comportaments materials a partir de núvols de partícules. Actualment Autodesk ha realitzat un acord amb SoftImage per poder fer servir el mòdul Lagoa en algunes aplicacions que requereixen motors d'animació com 3DStudio o Maya. Una de les propietats de SoftImage és que permet interactuar en temps real amb l'usuari mentre aquest modela per facilitar el procés d'animació, de manera que el sistema afronta un aspecte essencial dels sistemes dinàmics que és el fet d'establir una relació àgil amb l'usuari. Per poder gestionar les interaccions que s'estableixen dins el programa "SoftImage" fa servir una mena de programació visual a la qual anomenen ICE (Interactive Creative environment) ^{150 151}, aquest sistema és molt similar al que fa servir el mòdul Grasshopper de Rhino i s'emmarca en una família de sistemes de control que s'estan estenent ràpidament en el modelatge contemporani basats en la programació visual. En general el control de les relacions que s'estableixen entre els elements d'un model acostuma a ser una tasca complexa que fa inevitable l'ús de la programació. En aquests casos els sistemes de programació tova han permès solucionar el problema en ser capaços de controlar relacions complexes entre elements de forma visual. Amb aquesta aproximació podem controlar els objectes digitals amb molta més facilitat i això ha afectat positivament als sistemes dinàmics que fins ara no disposaven d'una estratègia de control suficientment potent com per controlar-los. Aquest principi s'acosta més a l'objectiu d'aquesta tesi que vol fer servir activament aquests mecanismes en arquitectura i en el qual per tant cal plantejar mecanismes avançats de control.

¹⁴⁸ Kolarevic, B., *Architecture in the digital age · design and manufacturing*, 2003 Taylor and Francis group, **Pag. 127 - 136**

¹⁴⁹ <http://thiagocosta.net/>

¹⁵⁰ Entorn creatiu interactiu <http://www.digitaltutors.com/training/softimage/ice-tutorials>

¹⁵¹ <http://lesterbanks.com/2011/05/an-in-depth-look-at-softimage-ice/>



Fig 22. Exemple de procés de trencament d'un bloc de material similar al formigo amb el mòdul LAGOA.

El funcionament del mòdul "*Lagoa multiphysics*" ens ofereix la possibilitat de simular una sèrie de fenòmens concrets basats en sistemes de partícules a partir d'elements predefinits com per exemple gelatina, fluids, etc.¹⁵² Per reproduir el comportament de materials flexibles-rígid, flexibles-elàstics, fràgils i fins i tot fluids es basa en relacions entre partícules que segurament estan basades en el sistema "Smooth particles hydrodynamics"¹⁵³ ja que els seus primers treballs es van basar en un article anomenat "Particle-based viscoelastic fluid simulation"¹⁵⁴.

Una de les característiques del mòdul lagoa és que en general parteix d'efectes predeterminats per tal de treballar amb més agilitat a l'hora de simular efectes. Això és un tema redundant en tots els programes dedicats a l'animació i respon a dues problemàtiques; En primer lloc a la dificultat que suposa per l'usuari inexpert programar el comportament d'un conjunt de partícules perquè facin el que desitja, i en segon lloc al fet que un usuari expert no sempre té necessitat de crear un comportament específic perquè amb un cas estàndard en té prou. D'aquesta manera es tendeix a treballar sobre models predeterminats els quals s'adapten al cas particular. A nivell geomètric veiem que de la malla bidimensional que trobàvem en la majoria de programes de modelatge arquitectònic que feien recurs a les simulacions físiques aquí s'ha convertit en una malla tridimensional més adequada per a la simulació d'elements volumètrics amorfs que puguin ser deformats, trencats, estirats, etc. Cal tenir en compte que l'objectiu inicial de "Lagoa" és crear animacions més que no pas geometries per tant a diferència del que passa amb els sistemes convencionals de CAD en els quals la feina de l'usuari és definir un model, aquí el que hem de

¹⁵² http://download.autodesk.com/global/docs/softimage2013/en_us/userguide/index.html

¹⁵³ <http://www.thebuzzmedia.com/lagoa-multiphysics-1-0-incredible-new-physics-engine-at-ubisoft/>

¹⁵⁴ Clavet, S, Beaouduin, P., i Poulin, P., "Particle-based viscoelastic fluid simulation" 2005 Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, Pages 219-228

fer és definir un comportament. Això posa de manifest una diferència important entre els mòduls d'animació i els sistema de modelatge dinàmics i és que mentre els sistemes de modelatge estan interessats en fer servir l'animació com un mecanisme de generació o form-finding, els mòduls d'animació en canvi busquen controlar el comportament o la manera com el model es transforma, per tant estan més interessats en controlar el procés que no la forma. Això implica que no trobarem les eines necessàries per crear un model precís a partir de mecanismes dinàmics sinó que més aviat trobarem eines per modelar el seu comportament amb precisió. Cal tenir aquesta diferència molt clara si volem comprendre els diferents aspectes que implica el treballar amb elements dinàmics perquè precisament molt sovint apareix aquesta dualitat entre controlar la forma o controlar el comportament per obtenir un resultat.

2.4.2 emFlock¹⁵⁵

L'autor d'aquest sistema es diu Erik Mootz i actualment es dedica a desenvolupar programari per a "Softimage". De nou ens trobem amb un mòdul de softimage que està basat en un sistema de partícules dinàmiques però que aquest cop parteixen d'un concepte molt diferent als que hem vist fins ara ja que aquest mecanisme s'aplica a la simulació de dinàmiques de grup en les quals un conjunt d'elements es comporten de manera relativament intel·ligent. El comportament dels elements en aquesta mena de simulacions és molt similar al de les simulacions físiques on cada node disposa d'una posició una velocitat i una acceleració, però a diferència d'aquestes també disposa d'una petita "intel·ligència" que li permet interactuar amb el conjunt de partícules de forma coherent segons el comportament dels elements del seu l'entorn. Això permet simular les reaccions dels individus d'un grup quan es relacionen entre ells per recrear així les dinàmiques de grup com bancs de peixos, estols d'ocells, etc. Per reproduir aquest moviment el seu autor ens explica que els diferents elements segueixen tres criteris fonamentals per relacionar-se amb el seu entorn que són:

- Separació: Per tal de no generar aglomeracions i col·lisions necessitem una mínima dispersió dels elements.
- Alineament: Els nodes tindran tendència a moure's en la direcció mitja dels elements del seu entorn, de manera que els grups es mouran en direccions uniformes.
- Cohesió: Cada membre del grup intentarà anar a una posició mitja dels elements del seu entorn, així naturalment es formaran grups.

¹⁵⁵ <http://www.mootzoid.com/html/XsiCorner/emFlock.html>

Tot i ser principis de relació simples mitjançant la correcta regulació d'aquests tres factors podem generar una gran varietat de situacions i moltes d'elles poden tenir correspondències amb fenòmens naturals. L'aspecte que es tracta "emFlock" és una aproximació molt diferent a les simulacions que hem vist fins ara perquè aprofita els principis de la física per generar un moviment continu d'aspecte molt real, però alhora ho barreja amb conductes intel·ligents que donen lloc a processos híbrids entre el natural i allò deliberat. En arquitectura aquesta aproximació pot ser molt útil per simular fluxos de persones o vehicles als quals hagi de respondre un disseny. Per mitja d'aquestes conductes de grup podem preveure quin serà el flux natural format i així decidir quina és la millor disposició de cadascuna de les peces. També és interessant pensar com seria treballar amb conjunts d'elements que es mantinguessin alienats o bé orientats en direccions determinades durant el desenvolupament del projecte. En conjunt podríem prendre decisions globals mentre tots els elements es resituen de manera autònoma seguint criteris determinats pel mateix arquitecte.

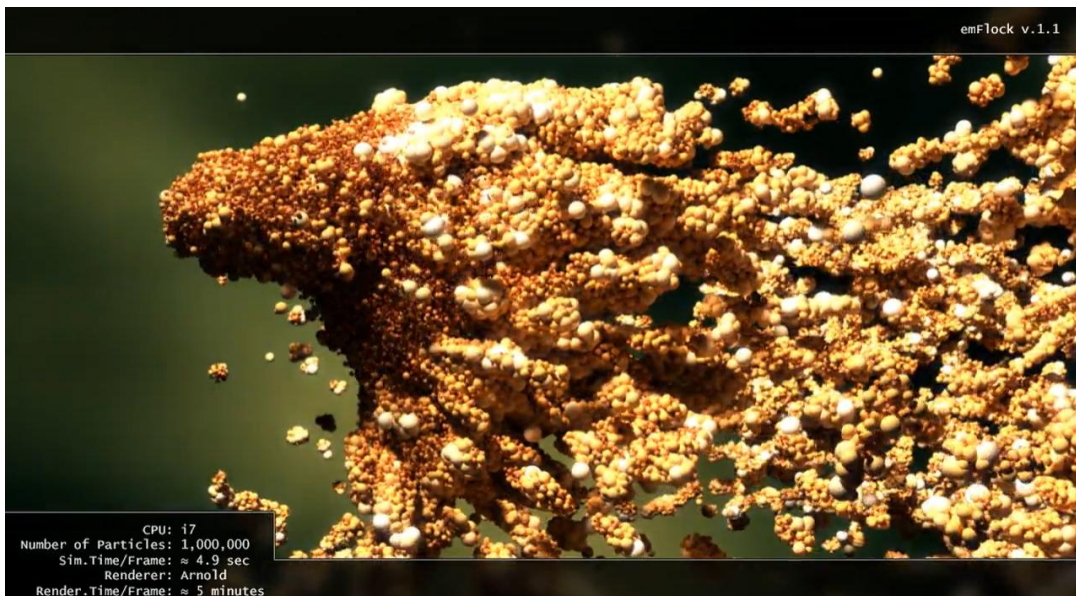


Fig 23. Exemple de dinàmica de grup obtinguda amb el mòdul emFlock en la qual un conjunt d'esferes de diferent radi i forma interaccionen entre elles.

2.4.3 PhysX ¹⁵⁶

Recentment la indústria dels vídeo-jocs ha mostrat un gran interès per la simulació de fenòmens físics d'animació en temps real en els quals l'usuari pugui intervenir directament causant un

¹⁵⁶ <http://udn.epicgames.com/Three/PhysicsHome.html>

efecte alhora realista i eficient en temps de càlcul. En aquest sentit han aprofitat la capacitat de computació que donen les targetes gràfiques per accelerar els càlculs centenars de cops i així poder simular grans nombres d'elements en temps real. PhysX és un simulador físic en temps real per al desenvolupament de jocs que els programadors fan servir per estalviar-se haver d'escriure el codi corresponent a les interaccions físiques dels objectes. Aquest ha estat desenvolupat per "AGEIA Technologies" que també és la primera marca que ha fabricat un chip PPU (Physics Processing Unit) dedicat exclusivament a la computació de càlculs físics com una ampliació del chip de la targeta gràfica.



Fig 24. Imatge que mostra el model que veurà el jugador (a dalt), i el model de col·lisions que computarà l'ordinador, com veiem hi ha una gran diferència en el nivell de definició entre tots dos.

En aquest context trobem PhysX com un dels primers motors exclusivament dedicat a aquesta finalitat, que compta amb un llarg historial de jocs en els quals s'ha aplicat i que permet reproduir des del moviment de vehicles fins a explosions o fluids de partícules. De forma resumida l'estratègia que emprada aquest sistema de cara a la simulació del comportament físic d'objectes sòlids distingeix entre dues classes d'elements, els estàtics i els dinàmics. Quan fem servir elements estàtics com serien cases, muntanyes, roques i altres podem generar un model simplificat del mateix al voltant de la figura que serà l'element en el qual es

computaran les col·lisions. Fixem-nos que per simular un mateix objecte fem servir dos models, un de representació i una versió simplificada del mateix per computar les col·lisions. En el cas d'elements dinàmics la cosa canvia perquè, a més de fer servir un model simplificat de col·lisió, el model es desplaçarà i canviarà la seva orientació a l'espai dificultant en gran mesura la regeneració del model de representació. En aquest sentit fan servir una estructura de base a la qual anomenen "bones". Aquests elements són intermediaris entre el model de representació i el model de col·lisió. En ser estructures molt esquemàtiques consistents en nodes units per barres que quasi no consumeixen recursos permeten estalviar-se amb facilitat la complicada tasca de posar en relació els dos tipus de model. Per extreure la posició i orientació necessàries per situar els models tridimensionals quan el cos es mou per l'espai es fan servir aquestes estructures bàsiques de les quals en podem extreure la posició i els vectors d'orientació. Alhora centralitzen

les accions dinàmiques de manera que les accions que rep el cos es canalitzen a aquest model simplificat. Gràcies a això es facilita en gran mesura la col·locació del model quan aquest pateix un impacte o una acceleració sobtada. Connectats amb aquests "bones", en el cas de cossos tous, es genera una estructura de "mass-spring" la qual, com ja hem vist, permet simular de manera molt senzilla el comportament de dinàmiques de materials tous com teixits, carn o gelatines. Val a dir que en aquest cas trobem dos estructures per a un sol objecte que seria el model de representació i el model de col·lisió connectats tots ells a través dels "bones".

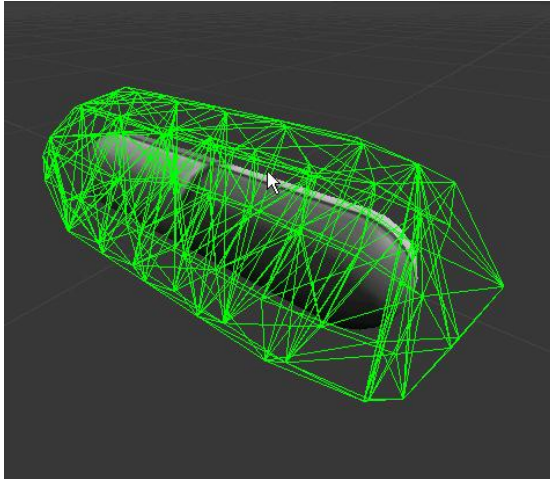


Fig 25. La present imatge mostra la malla que simularà el comportament dinàmic en relació amb el model de representació. Cal tenir present que la malla que veiem no és la que simula les col·lisions sinó únicament la que reproduïx el comportament dinàmic. En aquest sentit el punt de relació entre tots els models serien els "bones".

PhysX també admet la simulació de partícules¹⁵⁷ que es poden fer servir per explosions o per a la simulació de fluids, en aquest cas el sistema pot ser adaptat per simular un SPH. Per controlar les característiques del flux de partícules el sistema fa servir emissors, les propietats dels quals determinaran el comportament de les partícules. En els emissors trobem que podem activar o desactivar la col·lisió amb elements sòlids estàtics, elements sòlids dinàmics, la fricció corresponents a tots dos casos, la restitució per tots dos casos (entenem per restitució si el rebot és elàstic o inelàstic), el comportament com a SPH (controlant el radi d'acció, la viscositat i la rigidesa), i molts altres paràmetres que determinaran amb precisió quina mena de partícules volem obtenir. Els resultats obtinguts amb aquest sistema no deixen de ser sorprenents perquè hi han animacions¹⁵⁸ en les quals es pot veure un procés d'inundació d'un escenari concret a partir d'un flux d'unes 60.000 partícules (tal com es veu a la part superior esquerra del vídeo) en el qual es demostra com interactua amb elements estàtics i dinàmics (fixem-nos amb les capsas al centre de l'escena) i que es visualitza amb diferents modes donant aspecte d'aigua, quitrà o altres fluids.

¹⁵⁷ <http://udn.epicgames.com/Three/PhysXParticleSystemReference.html>

¹⁵⁸ <http://www.youtube.com/watch?v=KIMJFB0nEho>

Conclusió

Com veiem en observar aquestes estratègies, la precisió numèrica o el comportament científicament correcte no és l'objectiu principal de les animacions sinó que busquen aconseguir un aspecte realista i un moviment fluid especialment en jocs d'ordinador sense tenir massa en compte la validesa científica del resultat. Per fer-ho han de partir d'un plantejament més global que tingui en compte factors com el temps de càlcul, la interacció, el maquinari, etc. Ajuntant tots aquests factors han de sintetitzar molts coneixements de diferents àrees per poder generar escenaris immersius en els quals el jugador pugui executar tota mena d'accions en temps real. Tot i que no soc un gran aficionat als jocs reconec l'esforç i l'habilitat d'aquells que donen les eines necessàries per fer-los tot i lamentar que molt sovint aquestes només acaben servint per donar realisme a simulacions que poden arribar a ser extremadament banals. Però això no ens ha d'impedir apreciar l'enginy dels desenvolupadors de programari que han creat aquestes estratègies i aquest maquinari especialitzat. Tot aquest món promet donar moltes novetats en els propers anys i si trobem la manera d'aplicar-lo adequadament en el món de l'arquitectura aconseguirem aprofitar, de cara al treball d'arquitecte, un dels camps que està veient un major creixement. Com hem vist a la introducció son diverses les aplicacions que poden tenir aquests plantejaments en arquitectura i urbanisme, sobretot pel que fa al control de dinàmiques de grup (emFlock) simulant el moviment de la gent, els vehicles o els animals en relació al seu entorn. Per altra banda la simulació de fluids (Lagoa) i d'elements sòlids (PhysX) o viscosos pot tenir diferents aplicacions en el disseny de models que hagin de contenir fluids o bé per simular la resistència d'un terreny. Així, doncs, el ventall d'aplicacions que poden tenir aquests sistemes, que actualment ja estan al mercat, és potencialment ampli en arquitectura i per tant cal preguntar-se si ens interessa o no desenvolupar eines capaces d'integrar aquestes noves tecnologies en el camp de l'arquitectura. Si bé fins ara hem estat dependents del programari que ens arriba del món de l'enginyeria potser ja va sent hora que comencem a desenvolupar les nostres pròpies eines específicament pensades per a les necessitat de l'arquitecte. Per altra banda assegurar una forta vinculació amb un camp que està en plena expansió per assegurar el futur creixement de l'ofici.

3 Programa d'aplicació dinàmica

Un cop fets tots els plantejaments previs podem entrar a definir com serà l'eina que ens permetrà aplicar funcions dinàmiques en arquitectura. En aquest programa haurem de desenvolupar i posar en practica les idees que hem vist aplicades als diferents camps i vincular-les a una única estratègia de treball. Perquè tot això pugui tenir èxit ens caldrà escollir quin sistema de simulació és el més adequat, quin tipus de model ens convé, com el tractarem, quines funcions necessitem, etc. Un cop comencem a programar és molt habitual que es posin en crisis algunes de les idees inicials ja que quan es fa un plantejament teòric molt extens no és estrany que a la pràctica el programa contradigui o modifiqui les idees preconcebudes amb les quals l'abordem. En aquest sentit cal ser flexible i adaptar-se a les exigències del programa ja que de vegades posen de relleu errors de concepte i si ens obcequem en imposar la nostra idea segurament no les integrarem correctament en el si del programa, cosa que implica per igual aspectes de programació i aspectes conceptuals. Quan aquest és el cas comença un procés de degradació del codi que s'acaba traduint inevitablement en una pèrdua de claredat, major fragilitat del mecanisme i en general una menor qualitat del resultat. És quasi inevitable que la primera versió acabi d'aquesta manera i per tant que aquest primer programa acabi sent un prototip amb importants mancances funcionals. Tot i això ni molt menys hem de caure en l'error de pensar que és una feina perduda perquè a més de ser una eina d'investigació extraordinària també ens dóna una valuosa experiència per, quan reunim el temps i les energies necessàries, rescriure tot el programa de nou amb els conceptes teòrics i pràctics renovats amb resultats que en la major part dels casos acostumen a ser excel·lents. En aquest sentit intentaré investigar la major quantitat possible de problemes per més endavant fer una versió definitiva.

3.1 El llenguatge de programació

La primera decisió que cal prendre abans de començar a fer el programa és escollir quin llenguatge de programació farem servir. Aquesta decisió és molt important ja que segons les característiques i potencialitats del llenguatge tindrem accés a possibilitats ben diferents com connectar amb altres programes, tenir accés a la targeta gràfica o fer servir diferents mòduls SDK (software development kit) amb els quals connectar a altres entorns de CAD o de maquinari. Per altra banda segons el llenguatge que escollim gaudirem d'una major o menor velocitat de càlcul ja que no tots els llenguatges ofereixen el mateix rendiment en l'ús del processador. Tenint en compte aquests factors ens hem decantat per fer servir el llenguatge de

programació C#¹⁵⁹ (C sharp) que s'engloba en el pack de programació de "visual studio" que inclou VB.net, C# i C++. Aquest llenguatge permet un control molt acurat i complet dels sistemes de computació combinat amb una gramàtica relativament senzilla sobretot si la comparem amb altres sistemes com C++. Per altra banda és un llenguatge que s'ha popularitzat molt i per tant és habitual trobar tota mena de connectors i mòduls SDK per a integrar l'ús de la targeta gràfica o exportar dades directament a altres programes CAD. Però el factor decisiu que el fa una eina indicada per a experimentar amb ell és que permet un plantejament ràpid de prototips¹⁶⁰ de manera que s'adequa a la voluntat de la tesi d'investigar amb un programa que permeti comprovar els plantejaments teòrics. En aquest sentit un llenguatge de programació que sigui fàcil de reprogramar és fonamental de cara a poder experimentar amb diferents algorismes en un estudi exhaustiu ja que plantejar propostes ha de ser una tasca senzilla quan realitzem un estudi, per això fer servir un llenguatge més complicat com C++ amb el que a més no hi estic familiaritzat no ens va semblar una opció adequada. Quan el funcionament és senzill ens atrevim a plantejar diferents propostes sense por perquè programar-les no requereix un esforç excessiu, però quan això no passa és inevitable que es redueixi considerablement la capacitat d'investigació i proposició d'alternatives de manera que per investigar és essencial fer servir un llenguatge senzill.

En programar amb C# cal conèixer alguns conceptes bàsics per facilitar la comprensió del codi. Programar consisteix en generar un llistat d'instruccions que l'ordinador aplicarà per transformar una base de dades. Per entendre això plenament cal tenir molt clars els següents conceptes:

- Amb que treballem? amb una bases de dades o llistats d'informació.
- Com ho treballem? mitjançant instruccions.
- Com definim aquests dos elements? a través d'un codi que anomenem llenguatge de programació.

La manera com s'organitza el codi és determinant per facilitar o complicar la vida al programador i seria un dels factors que afectaria més directament a la facilitat d'ús del mateix. En el cas de c# una de les peces clau d'aquest llenguatge és el concepte de classe que hem emprat sistemàticament en generar aquesta aplicació. Entenem per "classe" un paquet en el qual tenim emmagatzemades bases de dades i unes instruccions de manera que podem anar agrupant dades i instruccions per categories sense que es barregin entre si i això facilita molt el treball de programació. Quan no es fan servir classes hem d'aplicar programació estructurada que vol dir que tot el codi s'escriu en un bloc i per tant les bases de dades, les instruccions i tots el elements

¹⁵⁹ <http://www.homeandlearn.co.uk/csharp/csharp.html>

¹⁶⁰ Chen, H., *Comparative Study of C, C++, C# and Java Programming Languages*, 2010

estan barrejats cosa que genera moltes dificultats tant en el procés de detecció d'errors com de localització i modificació dels mateixos. En el programa cada objecte és una classe que desa les dades necessàries per definir-lo i les funcions per controlar-lo i per tant hi ha una relació directa entre el codi i el funcionament teòric del sistema, això facilita tant la tasca de programació com la tasca de comprensió. A dins de cada classe tenim les dades necessàries per definir aquell objecte i també les instruccions més comuns que li aplicarem. Per exemple hi ha una classe que defineix la terna amb la qual treballa l'usuari, en aquesta classe emmagatzemo tres vectors i una posició. Les funcions més habituals en una terna són girar sobre algun dels eixos o situar-se en una nova posició i aquestes són precisament les funcions que van posades dins de la classe. Això és precisament el que permet la classe, agrupar aquests tres elements per no haver-los de buscar en mig del codi. És important conèixer també que les bases de dades es declaren en forma de variables que no són més que paquets d'informació que contindran un numero, una cadena de text o una classe. Els números poden ser de valor sencer (integer), de valor decimal de precisió simple (float) o valor decimal de precisió doble (double). Les classes com veiem són paquets d'informació que es poden declarar com una variable, això vol dir que si generem una variable i la declarem com a classe a dins seu contindrà totes les variables que haguem declarat per aquest classe. Imaginem que generem una classe anomenada "Vector" a dins de la qual hi ha declarades tres variables de tipus "double" anomenades dx, dy i dz. En declarar una variable "A" com a vector podrem accedir immediatament als valors dx, dy i dz de la següent manera "A.dx". Un altre concepte important són els llistats de variables amb els quals podem declarar un nombre molt elevat de variables amb una sola línia de codi. Així podem crear una variable amb un sol nom com per exemple "A" però que a dins tingui un llistat de valors als quals podem accedir per mitja d'un índex per exemple "A[1]" o "A[2]", etc. Aquest concepte és fonamental ja que molts cops treballem amb llistes de variables que ens estalvien molta feina declarant variables i que ens permeten emmagatzemar gran quantitats de dades d'un sol cop. Si rememorem el cas anterior si declarem "A" com un llistat de valors "Vector" podria accedir a cadascun d'ells escrivint "A[0].dx" o "A[i].dy", mentre que el que trobem entre els corxets és l'índex el que ve a continuació és la variable dx de la classe, per tant tenim un llistat de classes tot a dins de A. També és important dir que en el segon cas en comptes de posar un valor d'índex hem posat una variable entera anomenada "i" el valor de la qual serà l'índex. aquesta formulació també és vàlida per accedir a un valor del llistat. Amb aquesta breu introducció tenim una base molt modesta amb la qual poder interpretar les parts fonamentals del codi.

Per ampliar el coneixement de programació orientada a la geometria recomano la lectura del capítol 4 de *Elements of parametric design*, 2010, Routledge, p.49, Robert Woodbury.

3.2 Descripció dels elements bàsics de la simulació i funcionament intern

A l'hora de fer el plantejament del programa distingiré entre dues classes d'elements, els que es corresponen amb elements geomètrics i els que es corresponen amb camps de força que establiran relacions entre ells. Així, doncs, en el programa trobarem 5 elements geomètrics que seran la partícula, la recta, el pla, la corba i la superfície corba. Mentre que la recta i el pla, tot i ser considerats elements geomètrics en realitat seran camps de força que mantindran una sèrie de nodes (o partícules) en una disposició determinada, la corba i la superfície corba són pròpiament elements geomètrics que serviran de guia per als elements dinàmics. Encara que sembli confús hi ha una raó per la qual la recta i el pla són considerats elements geomètrics tot i mantenir la seva estructura per mitja de camps de força ja que es corresponen amb elements geomètrics que descriuran la realitat física del nostre model mentre que altres camps de força com els que presentaré a continuació no tenen correspondència amb elements físics sinó que afecten exclusivament a la disposició dels 5 elements geomètrics abans esmentats.

A més d'aquests cinc elements bàsics establiré una sèrie de forces que posaran els diferents elements en relació entre ells com per exemple les forces angulars, les forces d'equidistància, les forces d'atracció o repulsió entre nodes, les forces d'atracció a una recta o les forces de col·lisió. El que fan aquestes relacions és generar un camp de força concret que manté una relació geomètrica entre dos elements com per exemple fer que dues rectes siguin paral·leles o fer que la longitud de dues rectes sigui igual. Si modifiquem alguna de les dues rectes llavors l'altra immediatament es modificarà per seguir mantenint la mateixa relació geomètrica de tal manera que, per exemple, podrem deformar lliurement el model sense perdre els angles establerts. Aquestes forces també impediran que dos nodes es situïn a una distància menor que la suma dels seus radis. Aquests mecanismes són igualment vàlids per a treballar sobre el pla (en dues dimensions) tot i que les estratègies d'ús i les necessitats canvien entre el 3D i el 2D. Cal dir que a la tesi ens centrarem en el tractament tridimensional del model amb camps de força però cal fer tot un estudi sobre el efectes que això pugui tenir per a espais en dues dimensions.

3.2.1 La partícula

El sistema dinàmic proposat està basat en el model de partícules a partir del qual es construirà un model amb barres, plans, corbes i superfícies corbes. En aquest sentit la partícula o node acumularà la major part de propietats que controlaran la dinàmica del moviment i seran el subjecte que definirà en última instància tota la resta d'elements, d'aquesta manera tots els objectes que es defineixin a partir de nodes seran dinàmics. Quan relaciones partícules a partir

de barres podrem construir un model de "mass-spring" en el qual les relacions de distància determinen l'estructura i els graus de llibertat de cada node, també podrem afegir plans, que mantindran un conjunt de punts en un mateix pla mig, o bé corbes o superfícies corbes que es defineixen a partir de NURBS (veure capítol 3.2.6) que fan servir les partícules com a punts de control o de pas. Per altra banda si no afegim cap element més podrem treballar amb les partícules com si fossin un model de "hard spheres" que es relacionen per mitja de rebots i camps de força i que més endavant es poden fer servir per introduir models de SPH que imiten fluids. Així, doncs, basant-me en la partícula puc anar afegint nous aspectes a la simulació sense canviar el motor càlcul perquè interactuï amb el model de cara a afegir l'acció de fluids o de circulacions de vehicles o persones a partir de comportaments intel·ligents com hem vist a emFlock. De cara a la simulació, doncs, les dades que es desaran en una partícula hauran de tenir en compte no només la posició, com en els CAD convencionals, sinó també la velocitat, l'acceleració, la massa i les diferents propietats que en modifiquen el comportament. Gràcies al fet que guarda les mateixes dades que qualsevol sistema vectorial de representació, i només hi afegeix algunes altres de cara a la simulació del moviment, el sistema és completament compatible amb un model CAD i podrà importar i exportar dades amb relativa facilitat.

Per introduir el funcionament de la partícula ens cal tenir en compte com serà el control de la seva dinàmica perquè sigui senzill i al mateix temps ens permeti obtenir un ampli espectre de resultats. La manera més pràctica que hem trobat de fer això és generar un quadre de propietats que ens permeti controlar els paràmetres interns de la partícula de tal manera que podem obtenir l'efecte desitjat amb certa precisió. La única excepció a l'ús del quadre de propietats és el procés de generació del node on haurem de captar una posició a l'espai amb el mouse o per mitja d'una entrada manual de dades. A partir d'aquí haurem definit únicament la seva posició mentre la resta de propietats restaran amb el seu valor per defecte i les podrem modificar a través del panell de propietats. En aquest panell trobarem, doncs, la massa, els graus de llibertat del moviment, la intensitat de les forces d'atracció o repulsió, l'acció de forces puntuals, el radi o si el punt en qüestió està actiu o inactiu. Totes aquestes propietats afectaran la resta d'elements com els plans, les rectes o les NURBS (veure capítol 3.2.6 i 3.2.7) que estiguin definits amb partícules. Així, doncs, controlar les propietats de la partícula és fonamental de cara a controlar el sistema dinàmic en general.

Actiu / Inactiu: La primera propietat que cal conèixer és que les partícules tenen dos estats bàsics que són actives o inactives. Si un node està actiu es comportarà de manera dinàmica i per tant es podrà desplaçar lliurement per l'espai per mitja de l'acció dels camps de força modificant la seva posició segons les accions que rep. En aquest estat es poden simular el moviment dels objectes i totes les propietats que en són derivades com les corbes o els arcs funiculars,

diferents processos d'optimització, etc. També pot ser que un node estigui inactiu, en aquest cas només modificarà la seva posició quan l'usuari el desplaci deliberadament, tal com passa en qualsevol programa CAD.

Graus de llibertat: Una altra propietat important rau en la possibilitat de bloquejar el moviment de la partícula en algun dels sentits principals dels eixos de manera que en limitem la seva capacitat de moviments a un pla ja sigui xy si bloquegem en el sentit de la "z", xz si bloquegem la "y" o yz si bloquegem la "x". També podem forçar el moviment en una direcció principal si bloquegem dos sentits del moviment com la "x" i la "y" forçant el moviment en el sentit "z". Amb això podem passar de treballar en tres dimensions a dues de manera molt senzilla en bloquejar el moviment en el sentit de la "z".

Radi i massa: De cara a la interacció amb altres partícules apareixen dues propietats que regularan les col·lisions que seran la massa i el radi. La massa determinarà la inèrcia de cada element respecte altres i per tant el pes que tindran les seves accions en el conjunt. Quan volem donar prioritat a un element canviant la massa observem que això té uns efectes molt notables sobre la resta sense deixar d'interactuar de manera natural. En alguns casos aquest mecanisme és fonamental per establir un control còmode dels elements dinàmics. El radi ens permet indicar la distància mínima a la qual xocaran les partícules. Entre les seves utilitats de cara al disseny ens permet impedir que es formin amalgames de partícules per sota d'una distància mínima la qual cosa dota al model d'una capacitat molt bàsica de comportament "intel·ligent" en el sentit que mantindrà una certa coherència formal.

Forces: Dins de les propietats del node també hem inclòs la possibilitat de controlar dues classes de forces. La primera és una força de tipus vectorial que es controla a partir de paràmetres numèrics. Aquests valors seran l'acceleració del node en cadascuna de les tres components de l'espai de manera que fenòmens com la gravetat, el vent o altres poden ser fàcilment simulats. Si ens fixem en les opcions que apareixen a l'apartat "Force properties" veurem que hi ha tres opcions a sobre de les caselles on posem les coordenades del vector de força que són:

- "Vent" Aplicarà la força tenint en compte les normals a l'hora de pressionar les partícules. La normal ve donada pels plans que conflueixen a la partícula i que en conjunt donen un valor de normal mig.
- "Vent invers" és una opció experimental basada en els principis de la catenària en la qual aplico de manera inversa el vent per tal d'obtenir un element preparat per resistir majoritàriament a compressió. És basa en el mateix principi que els sistemes funiculars però aplicat a un cas de vent.

- "4 vents" és també una opció experimental en la qual la partícula es veu sotmesa a diverses carregues de vent alhora de manera que les ha de resistir totes. Aquests vents no s'afecten entre ells sinó que actuen tots alhora sobre el model encara que sigui en direccions oposades.

En el cas que posem alguna de les opcions abans esmentades la normal del node ve determinada per la normal mitja dels plans que hi conflueixen de manera que si no hi ha plans que continguin el node aquest actua com si hi actués una força normal i corrent. Per altra banda un percentatge de l'àrea que correspon a cadascun dels plans que conflueixen a la partícula es suma com a una àrea pròpia d'aquesta de manera que la pressió del vent és multiplica per l'àrea que correspon al node i com més grans són els plans que conflueixen a la partícula més força rep aquesta. d'aquesta manera es pot simular amb un mínim de realisme i en temps real com seria el moviment aproximat d'una estructura en rebre una càrrega de vent.

Un altra família de forces basades en la partícula són les forces a distància que actuen radialment com la gravetat o les forces electromagnètiques. Aquestes tenen moltes opcions de control que variaran sobretot l'efecte que té la distància sobre la intensitat de la força. Apareixen, doncs, tres possibilitats que són "contínua", "multiplicada" o "dividida". Si rememorem les lleis de la gravitació de newton recordarem que:

$$g = G \times \frac{m}{d^2}$$

En la qual **g** és la força de la gravetat, **G** la constant de la gravitació, **m** la massa del cos i **d** la distància a la qual aquest es troba. Si ens fixem veurem que la distància està elevada al quadrat i dividint a la massa de tal manera que com més gran és la distància, més petita és l'acceleració. La distància i la massa són els dos únics factors que fan variar el valor de la força i en el cas de la massa aquesta acostuma a romandre constant durant la simulació per tant la distància serà el valor que més sovint alterarà el valor de **g**. Així, doncs, la manera com apliquem la distància tindrà un efecte molt notable en els resultats i per això ofereixo la possibilitat d'alterar la manera com aquesta s'aplica. La fórmula original en la qual es divideix pel quadrat de la distància és només una de les possibles maneres que tenim d'aplicar aquesta formula perquè també podríem multiplicar per la distància o mantenir el valor constant. En el cas del tractament de cossos dinàmics és possible que ens interessi fer l'efecte contrari en el qual com més lluny estigui el cos més forta sigui la interacció i com més proper més petita la qual cosa ens pot ajudar a mantenir els elements dins un àmbit concret. Per això hem afegit les tres possibles maneres de tractar la distància dins les propietats de la partícula perquè l'usuari esculli la que li vagi millor. Val a dir

que aquestes variacions no afecten únicament a la distància sinó que també la constant G s'acostuma a veure modificat el seu valor a causa de que en la formulació original només permet efectes notables en períodes extensos de temps o per masses molt elevades, però a escala humana té un efecte imperceptible i per tant cal incrementar-lo. Així, doncs, podem experimentar amb sistemes pseudo-físics (Com hem vist en "Kangaroo") de cara a millorar el control dels sistemes dinàmics.

El codi

```

2416 public class KinePnt
2417 {
2418     public object Tag;
2419     public OptionConnectFloat Fr = new OptionConnectFloat(0);
2420     public ConnectVector Força = new ConnectVector();
2421     public OptionConnectInt Group = new OptionConnectInt();
2422     public OptionConnectBool UVFollow = new OptionConnectBool();
2423     public OptionConnectBool Active = new OptionConnectBool();
2424     public OptionConnectBool Control = new OptionConnectBool();
2425     public OptionConnectDouble Mass = new OptionConnectDouble();
2426     public OptionConnectBool Fcx = new OptionConnectBool();
2427     public OptionConnectBool Fcy = new OptionConnectBool();
2428     public OptionConnectBool Fcz = new OptionConnectBool();
2429     public OptionConnectBool Wind = new OptionConnectBool();
2430     public OptionConnectBool WindInv = new OptionConnectBool();
2431     public OptionConnectBool FourWinds = new OptionConnectBool();
2432     public OptionConnectBool Atraction1 = new OptionConnectBool();
2433     public OptionConnectBool Atraction2 = new OptionConnectBool();
2434     public OptionConnectBool Atraction3 = new OptionConnectBool();
2435     public OptionConnectDouble x = new OptionConnectDouble();
2436     public OptionConnectDouble y = new OptionConnectDouble();
2437     public OptionConnectDouble z = new OptionConnectDouble();
2438     public OptionConnectDouble RadMn = new OptionConnectDouble();
2439
2440     public bool Kill = false;
2441     public float u = -1, v = -1;
2442     public float Nx, Ny, Nz;
2443     public double vx, vy, vz;
2444     public double ax, ay, az;
2445     public double xi, yi, zi;
2446     public double x0, y0, z0;
2447     public int[] List;
2448
2449     public void GenerateData(int Val)...
2450     public void KillData(int id)...
2451     public void Reset()...
2452     public void GetData(KinePnt Pt)...
2453     public void InitializeSel(VAxis View, OptionConnectBool Actv, i
2454     public void Represent(int id, Pantalla Drw, int SelG, KinePnt
2455     public void Verifiy(int Lastli, int Newli, int Npt)...
2456     public void VerifiyDel(int li, int Npt, KinePnt[] Pts)...
2457 }

```

Fig 26. Codi en c# que descriu la classe partícula anomenada internament "KinePnt". El codi que descriu la classe es troba entre el corxet superior i el inferior i com podem veure ha quedat empaquetat per grups. Si ens fixem en el numero de línies la classe comença al 2416 i acaba al 2610 per tant han quedat amagades quasi 200 línies de codi en les funcions empaquetades. Això és simbolitzat amb el signe "[...]" que veiem al final de les funcions inferiors.

Explicar tot el codi que afecta a la partícula seria una tasca extremadament extensa i per això prefereixo exposar només un fragment significatiu del mateix. La partícula observada des del codi és una classe i per tant conté una sèrie de propietats i instruccions que cal conèixer de cara a entendre'n plenament el funcionament. Tal com comentava quan parlava del llenguatge C# programar consisteix en modificar una base de dades en base a una sèrie d'instruccions que nosaltres donarem. La base de dades està declarada a la part superior de la classe i bàsicament podem considerar que totes les línies que no acaben amb "[...]" són bases de dades. Entre les

variables declarades en aquesta classe trobem les posicions X, Y i Z com "*OptionConnectDouble*" (línies 2435, 2436 i 2437) que en realitat són valors numèrics de precisió doble que han estat modificats per permetre una fàcil connectivitat amb el sistema de menús. Els valors de velocitat i acceleració estan declarats com vx, vy, vz, ax, ay i az i són valors de doble precisió però que no requereixen connectivitat. A més d'això trobem valors que ens indiquen la normal per al node, que només està present quan forma part d'un pla (Nx, Ny, Nz). També es declara una variable anomenada "Força" (línia 2420) que es declara com a classe de tipus "connectVector". Aquesta classe és de creació pròpia i conté tres valors de precisió doble anomenats dx, dy i dz. Altres opcions són possibilitats booleanes de vertader o fals amb les quals controlem si la partícula estarà afectada pel vent (línies 2429, 2430, 2431), si estarà activa (línia 2423), quin comportament tindrà la força d'atracció que actuarà en ella (línies 2432, 2433, 2434), els graus de llibertat (línies 2426, 2427, 2428), la massa, el radi (2438), etc..

Un cop introduïdes les variables que descriuen la partícula exposo un exemple de càlcul dinàmic per comprendre el funcionament del mecanisme. En aquest cas es tracta de la funció que controla les forces d'atracció entre partícules que com hem vist tenen tres possibles variants.

```

5379         xx = Pts[i].x.Val - Pts[j].x.Val;
5380         yy = Pts[i].y.Val - Pts[j].y.Val;
5381         zz = Pts[i].z.Val - Pts[j].z.Val;
5382         dd = Math.Sqrt(xx * xx + yy * yy + zz * zz);
5383         double di = dd;
5384         if (dd > 0)
5385         {
5386             num = Pts[i].Mass.Val + Pts[j].Mass.Val;
5387             m1 = Pts[j].Mass.Val / num;
5388             m2 = Pts[i].Mass.Val / num;
5389             xx /= dd;
5390             yy /= dd;
5391             zz /= dd;
5392             if (dd < 1) { dd = 1; }
5393             if (dd > 100) { dd = 100; }

```

Fig 27. Codi que descriu el procés d'atracció entre dues partícules en el qual es pot observar el procés de càlcul en detall.

De cara a comprendre el codi el primer que cal saber és que són cadascuna de les variables que intervenen. En primer lloc trobem els nodes que tractem definits amb la variable "PTS" seguida de dos parèntesis amb una lletra que en aquest cas és "i" i "j". El que significa aquesta nomenclatura és que PTS és un llistat de variables de la classes "partícula", quan volem recollir els valors d'alguna d'elles ens cal indicar quina partícula volem amb una xifra de índex. Aquest índex va posat dins els parèntesis i les lletres "i" i "j" són altres variables que contenen un valor enter que fem servir d'índex. Per exemple pot ser que "i" valgui 1 i "j" valgui 12, llavors estarem treballant la interacció entre la partícula 1 (PTS[1]) i la 12 (PTS[12]). De cara al càlcul tenim xx, yy, zz i dd com tres variables que emmagatzemen la diferència entre les posicions x, y i z dels dos nodes que calculem i que pot ser entès com el vector que uneix "i" amb "j", aquesta funció la

veiem representada entre les línies **5379** i **5382**. A dd deixaré el valor de la distància total calculat com l'arrel quadrada de la suma de les tres components xx, yy i zz al quadrat i que es correspon amb la longitud del vector que uneix "i" amb "j". Només en el cas que la longitud del vector sigui diferent a 0 procediré a calcular la força entre totes dues partícules, en el cas contrari el fet que la distància entre els cossos sigui 0 pot donar lloc a errors en el codi i per tant, en ser un cas altament excepcional, no ho considerarem tal com es veu a la línia **5384**. Un altre factor a tenir en compte és la proporció de masses entre les partícules de manera que el cos amb més massa rebi una acceleració mes petita que el cos de menor massa i per tant es transmeti la mateixa energia d'un a l'altre. Aquesta proporció està considerada a les variables m1, m2 i mm en les quals emmagatzemo la massa del node "i", el "j" i la suma de tots dos o massa total. Calculant la proporció de massa que li correspon a cada partícula respecte la massa total puc establir quina part de l'acceleració s'emporta cadascun. Aquest mecanisme és teòricament conservatiu però les situacions extremes li poden fer perdre aquesta propietat. el càlcul de proporció entre les masses es realitza a les línies **5386**, **5387** i **5388**. A continuació es divideix el vector per la seva longitud per tal de trobar el vector unitari i llavors es passa a calcular la força entre les dues partícules pròpiament dita. Aquesta càlcul té lloc de les línies **5392** a la **5408** i a continuació el descriuré en detall.

```

5392      if (dd < 1) { dd = 1; }
5393      if (dd > 100) { dd = 100; }
5394      f = 0;
5395      if (Pts[i].Attraction1.Val) { f = -Fac * (2500 / dd) * MaxN; }
5396      if (Pts[i].Attraction2.Val) { f = -Fac * (dd / 0.035) * MaxN; }
5397      if (Pts[i].Attraction3.Val) { f = -Fac * (200) * MaxN; }
5398
5399      if (Pts[j].Attraction1.Val) { f += -Fac * (2500 / dd) * MaxN; }
5400      if (Pts[j].Attraction2.Val) { f += -Fac * (dd / 0.035) * MaxN; }
5401      if (Pts[j].Attraction3.Val) { f += -Fac * (200) * MaxN; }

```

Fig 28.Codi que controla l'atracció entre les partícules.

A les línies **5392** i **5393** es limita les possibles magnituds de distància a introduir. Si no es fes això podrien entrar en la formula valors extrems de distància que possiblement donarien errors de càlcul. Per evitar aquests error es limiten les possibles magnituds de distància en la formula a valors compresos entre 1 i 100. Fet això es reinicia la variable f (línia **5394**) i es passa a calcular la força d'atracció pròpiament dita segons les opcions de càlcul que haguem donat. Aquestes opcions es manifesten a les línies compreses entre la **5395** i la **5401**. Cada node té tres opcions de càlcul assignades que quedes emmagatzemades en un valor booleà (vertader o fals) anomenat "*Attraction1*", "*Attraction2*", "*Attraction3*" que s'accedeix a traves del node amb la formulació *Pts[i].Attraction1.Val* que ens retorna el valor d'aquesta opció tal com veiem al codi. Quan aquesta opció és vertadera s'executa el càlcul. En aquest càlcul hi ha tres possibles opcions:

- *Atraction1:* En aquest cas la fórmula d'atracció serà $f = -Fac \times \frac{2500}{dd} \times Maxn$ on " f " serà la força que exercirà el node, " Fac " serà el factor d'intensitat de la força que nosaltres hem assignat i que tindrà valors entre 0 i 1, de manera que podem regular manualment la intensitat de la força. " $\frac{2500}{dd}$ " és un valor que sorgeix de canviar el valor de la constant de la gravitació G per 2500 de manera que els efectes són molt més significatius que en el cas de la gravetat real. En canviar G per aquest valor i dividir-lo per la distància, que ara no està elevada al quadrat, obtenim el valor que variarà segons la distància. Al no estar la distància elevada al quadrat el increment d'intensitat de la força és molt més suau i per tant molt més fàcil de manipular per part de l'usuari. Finalment hi ha el valor $MaxN$ que té un paper purament correctiu de la intensitat de la força i evita descontrols en ser un factor que disminueix la intensitat segons el nombre d'interaccions simultànies que tenen lloc al conjunt.
- *Atraction2:* Ara la fórmula és diferent sent $f = Fac \times \frac{dd}{0.035} \times Maxn$. En aquest cas la distància passa a multiplicar de manera que com més lluny estigui l'objecte, més forta és la interacció. La constant G passa a ser 28 o $(1 / 0,035)$. Per tant com veiem dona una xifra molt superior a la natural encara que inferior a la del primer cas.
- *Atraction3:* Finalment la última formula manté el valor constant i no té en compte el valor de distància sent $f = Fac \times 200 \times Maxn$. En aquest cas la constant G passa a ser el factor decisiu que controla intensitat i pren un valor de 200. És si més no curiós que la constant G canviï el seu valor de manera proporcional al tipus d'operació que es realitza a la formula. De manera purament empírica hem anat extraient els valors de G perquè donessin lloc a un comportament fàcil de controlar per part de l'usuari. En aquest procés els valors obtinguts han estat 2500 al primer cas, 28 al segon i 200 al tercer. Com veiem quan la distància divideix el valor puja, en multiplicar baixa i en ser constant obté un valor mig entre els dos anteriors cosa que és lògica i al mateix temps curiosa.

Calculada la força aquesta s'aplicarà segons les opcions que tinguem activades en cadascuna de les dues partícules de tal manera que es repeteix dos cops el càlcul (línies 5395 a 5401) un per la partícula "i" i un altre per la partícula "j". Fet només ens faltaria establir l'acceleració que rebrà cadascun dels cossos involucrats en la interacció i en aquest cas ens caldrà aplicar la proporció entre les masses dels dos elements, el vector director que les uneix i la força " f ". La formula queda de la següent manera: $a = dx \times f \times m$ en la qual a és l'acceleració dx la direcció del vector director, m la proporció entre les masses dels dos cossos i f la força pròpiament dita. En conjunt, doncs, hem vist quina és l'estructura general del node en el programa dinàmic, com es controlarà i com és el codi amb que la defineix.

3.2.2 La barra

La barra és un dels elements bàsics que més es fa servir en els programes de CAD i a diferència de la partícula, que en general és un element abstracte, la barra té correspondència directa amb elements arquitectònics de l'obra com pilars, estructures de malles, estructures metàl·liques, etc. Així com en el cas del node, la barra no patirà canvis substancials en la seva definició entre els sistemes vectorials i els sistemes de càlcul estructural cosa que acompanyada del fet que té correspondència directa amb elements arquitectònics la fa un element ideal per comunicar informació del món del dibuix vectorial al món del càlcul d'estructures. A causa d'això la majoria de programes de càlcul només et deixen importar un model de barres i nodes del teu edifici ignorant tota la resta d'elements geomètrics que no poden ser fàcilment interpretats. Aquest fet fa que sigui molt atractiu treballar amb models de barres, tant per a la definició bàsica de l'edifici com per al seu càlcul posterior, per tant en el programa de simulació dinàmica hem optat per aquest model bàsic. A nivell de càlcul també té propietats excepcionals perquè ja hem vist en repassar els mecanismes de simulació física que el models de "mass-spring" tenen capacitat no sols per simular estructures de barres sinó també de simular sòlids i fins i tot comportaments relativament complexes com elements biològics o peces de roba. Així, doncs, és una estratègia relativament eficaç per simular estructures de barres en temps real que permet reproduir tota mena de situacions i que a més mostra un altra grau de compatibilitat amb altres plataformes.

3.2.2.1 *Descripció*

La barra acostuma a estar definida per dues posicions a l'espai que normalment es corresponen amb nodes. Aquests dos elements poden ser dades internes de la barra o poden ser referències a nodes externs, com és el nostre cas. Si són dades internes llavors la barra ha de guardar la posició a l'espai dels seus extrems i això implica desar com a mínim 6 valors de posició, però si a més volem que el sistema sigui dinàmic cal afegir les corresponents acceleracions, velocitats, masses, etc. de manera que és un sistema de consumeix molta memòria. Però el més important és que el fet de fer servir referències externes permet que un mateix node pugui pertànyer a una o diverses rectes, a un o diversos plans i a una o diverses estructures NURBS (veure capítol 3.2.6 i 3.2.7) al mateix temps de manera que amb molt poques operacions obtenim una compatibilitat total dels elements entre si. Si recordem el concepte de "bones" que havíem vist en parlar del sistema "Physx" (veure capítol 2.4.3) recordarem que aquesta estructura bàsica que anomenen "bones" és precisament un element que fa d'intermediari entre tots els elements que a ell s'associen i que permet estalviar molt de codi i memòria. Aquest serà el paper que jugaran les partícules en el programa dinàmic en vincular-se els diferents elements.

De la mateixa manera que en el cas de la partícula la generació de la barra és relativament trivial i comú a la resta de sistemes CAD. Per definir-se només necessita que se li assignin dos posicions a l'espai. Geomètricament parlant la barra no té gruix sinó únicament longitud per tant de cara al càlcul de l'estat de tensió de la barra només és necessari retenir el valor inicial de longitud per saber quant s'ha deformat en un moment donat. Sense aquesta dada no podríem saber si la barra s'ha estirat o s'ha encongit. Per altra banda es pot jugar amb aquesta longitud inicial estirant-la o encongit-la segons l'estat tensional simulant així la deformació plàstica de l'element.

Amb estructures formades per múltiples barres es poden construir models de "mass-spring" tal com hem vist en les simulacions mèdiques o d'animació. Aquests models acostumen a ser molt eficients a nivell de càlcul i extremadament versàtils en el seu ús, però a canvi presenten un inconvenient greu ja que per estructures complexes no planteja un sistema de modelatge gaire pràctic ni intuïtiu, ja que cal posar centenars i centenars de barres amb disposicions concretes per poder simular el comportament d'un element amb precisió. Per això s'acostuma a automatitzar aquest procés de manera que l'usuari no hagi de situar tots els elements en introduir una estructura de barres. En el nostre cas farem servir malles definides per barres com elements predeterminats amb els quals treballar tal com hem vist que fan la majoria de sistemes similars que recorren a estructures predeterminades de cara a treballar amb més comoditat.

3.2.2.2 *La barra entesa com a camp de força*

Com hem dit al principi tot i que la barra és considerada un objecte en realitat és un camp de força que es s'entén com a objecte perquè descriu elements materials del projecte. La força que genera la barra treballa de manera axial establint una relació de distància entre dos nodes en la qual es procurarà que aquesta no variï. Si un extrem és troba a una posició més allunyada o més a prop de l'altre extrem que la distància base llavors es genera una força de reacció que intenta compensar aquest augment o disminució de la distància amb una força en sentit contrari. Mitjançant aquest mecanisme els elements es mantenen a distàncies fixades si no apareix alguna altra força que superi aquesta acció compensatòria. El mecanisme que hi ha darrera d'aquest comportament es basa en les lleis de l'elasticitat de Hooke, amb les quals es simula el comportament d'un cos elàstic quan es deforma una longitud determinada. Si recordem la fórmula de Hooke veurem que la reacció és equivalent al canvi de longitud de la barra multiplicada per un factor constant:

$$f = -k \times \Delta x$$

Sent f la força resultant del càlcul, k la constant d'elasticitat i Δx l'increment o disminució de longitud.

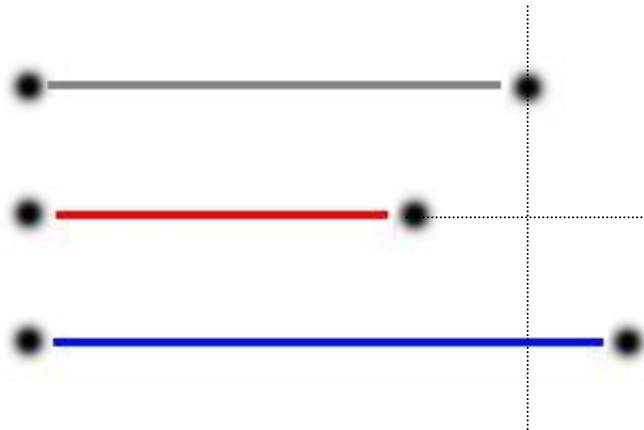


Fig 29. A l'esquema es representa el funcionament bàsic de la funció de cordes on veiem que a dalt de tot està representat l'estat de repòs on la distància entre les dues partícules és igual a la distància inicial i per tant no hi ha increment de longitud. Al mig trobem que la distància s'ha reduït i per tant apareix una força que repel·leix les partícules entre elles per tal d'assolir de nou el punt d'equilibri. A baix de tot apareix el cas contrari on en augmentar la distància entre les partícules apareix una força que les atrau.

Fent servir aquesta fórmula com a base de treball es poden fer derivacions basades en el mateix principi però amb adaptacions particulars per imitar comportaments concrets. Fixem-nos que aquesta fórmula actuarà sempre de manera axial cosa que vol dir que no es tenen en compte les forces tallants ni tampoc el pandeig per tant és ideal per a casos en els quals o bé no ens interessin aquests fenòmens, o bé no arriben tenir un efecte significatiu en la simulació. Però si fos necessari introduir-los podrien ser fàcilment implementats¹⁶¹ cosa que ja hem plantejat per futures versions del programa en les quals incorporarem aquesta opció de càlcul. Un altre peculiaritat d'aquesta fórmula és la seva simplicitat i eficiència que la fa ideal per treballar en temps real. Com ja hem vist s'han plantejat simulacions mèdiques i sistemes hàptics (veure capítol 2.3.11) basats en models de "mass-spring" per tal de simular cirurgies en temps real, imitant òrgans i teixits biològics que requereixen mantenir el volum constant o reproduir el comportament anisòtrop d'alguns materials¹⁶². Això vol dir que es pot transformar aquesta formulació perquè tingui en compte aspectes de resistència i comportament estructural en temps real, cosa que pot ser d'interès en el camp de l'arquitectura. De moment però, la fórmula aquí implementada no està tenint en compte el mòdul de Young segons el material, ni la deformació plàstica, ni el trencament, ni la disminució de resistència segons la temperatura, etc. Però se que és possible implementar-ho perquè ja ho hem experimentat en altres programes amb bons resultats aconseguits en fer un replanteig profund de la fórmula.

¹⁶¹ Choi, K.J. Ko, H.S., "Stable but Responsive Cloth", 2005, SIGGRAPH '05 ACM SIGGRAPH 2005 Courses, Article No. 1

¹⁶² B Bourguignon, D., Cani, M.P., "Controlling anisotropy in mass-spring systems", August 2000 *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation* (EGCAS), page 113–123

3.2.2.3 Llistat de propietats de la recta

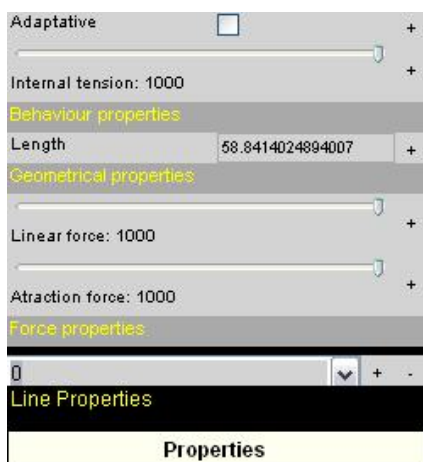


Fig 30.Quadre de propietats de la barra en el qual podem distingir entre propietats geomètriques, dinàmica interna i dinàmica externa.

Els mecanismes de control més bàsics per aquest element es basen en modificar la longitud inicial de la barra i la intensitat de la força que exerceix. Variant la longitud inicial fem que la barra variï la distància a la qual els nodes queden en equilibri. Fent això el sistema busca un nou estat d'equilibri que satisfaci la nova condició de longitud. Si la fórmula és $f = -k \times \Delta x$ i l'increment de longitud és $\Delta x = x - x_0$ resulta que el factor x_0 és un valor constant que s'emmagatzema a la recta. Si una barra està en equilibri normalment es deu al fet que $x = x_0$. Si variem el Valor de x_0 llavors el sistema deixarà d'estar en equilibri i per tant es generarà tensió que tendirà a desplaçar els extrems cap al nou punt d'equilibri. La intensitat en canvi controla el valor de la constant elàstica augmentant o disminuint la força de reacció davant els canvis de longitud. Si és 0 la força no actua i els extrems de la barra es mouen lliurement sense mantenir una distància fixada, en canvi si és 1 actua en tota la seva intensitat. La programació del càlcul però està plantejat de manera més complexa que la de la dinàmica de les partícules ja que es fa de manera més dispersa i indirecta. Així el factor que augmenta o disminueix la força s'aplica sobre el sumatori de masses de la partícula de manera que com més gran és el sumatori de masses més petita és la proporció de forces que s'emporta cada partícula. De la mateixa manera molts altres factors estan desglossats en diferents càlculs i per tant no ajudaria el fet de mostrar el codi. Tot i això es podria descriure la idea general de la fórmula de la següent manera $f = \Delta x \times 50 \times fac$ on "fac" és la intensitat de la força, Δx l'augment de longitud i 50 el valor de "k" dins la fórmula. L'acceleració es calcula com $a = f \times dx \times m1$, sent "dx" el vector director de la força i "m1" la proporció de masses de manera que de la mateixa manera que en el cas de les fórmules d'atracció entre partícules, els elements amb menys massa s'emporten la major part de l'impuls. Que la força f no sigui zero depèn, doncs, de dos elements bàsics, el primer és que fac tampoc sigui 0, i el segon és que la longitud no sigui igual a la distància de base de manera que Δx no sigui igual a 0. Quan es compleixen aquestes dues condicions f no serà zero i es generarà impuls.

Tot i que aquests dos mecanismes treballen activament sobre la fórmula dinàmica de la barra també apareixen altres mecanismes de control que són fruit de l'ús pràctic d'aquest sistema i que no es deriven de la fórmula inicial com per exemple l'ús d'un factor de tensió interna que fa que la barra sempre estigui tensa. Aquest factor fa que la distància " x_0 " sigui sempre una mica menor

que la distància real entre els dos nodes de la barra de manera que la barra sempre està retraient-se i per tant actua com si estigués tensa mantenint els extrems de la barra a la mínima distància. Aquest mecanisme permet generar fàcilment superfícies mínimes quan treballem amb malles i a més fa que aquestes es puguin adaptar a canvis de longitud significatius sense perdre una estructura reconeixible i fàcil de modificar. Fer servir aquest sistema és essencial de cara a retenir un control intuïtiu de la barra ja que sense ell quan les barres han de treballar a compressió patim plegaments en la malla que dificulten molt la comprensió del procés i el seu ús i que es deuen al fet de treballar amb longituds fixades. Hi ha un factor que dóna el valor de la intensitat d'aquesta "retracció" que la manté en tensió. Aquest factor senzillament redueix en major o menor mesura la longitud base " x_0 " de manera que com més reduïm la longitud base major és la diferència entre la longitud actual i la de base i per tant més tensió es genera. Potser el fet més contra-intuïtiu d'aquest mecanisme és que si deixem una barra amb els dos extrems lliures aquesta es comprimeix fins a desaparèixer. Aquesta és una conseqüència lògica del mecanisme però té lloc molt poques vegades ja que per regla general les rectes estan integrades dins una estructura major que no els permet reduir-se fins a desaparèixer.

3.2.2.4 Forces basades en la recta

Quan treballem amb models dinàmics es fa difícil establir relacions de linealitat o de paral·lelisme entre els diferents elements perquè contínuament estan canviant de forma. Per això cal generar una sèrie de funcions que siguin capaces de preservar aquestes relacions encara que el model es transformi. En aquest sentit es plantegen diversos tipus de força com les angulars, les equidistàncies i les vectorials que ajuden a controlar aquests aspectes de difícil control en un sistema dinàmic. El cas que tractaré a continuació és el de les forces vectorials que tenen la capacitat de mantenir tot un seguit de nodes sobre la mateixa barra de manera que es preservi la linealitat de les seves posicions sense que l'usuari hagi de preocupar-se'n. Aquesta força ha estat tractada com una acció integrada dins de les barres encara que la seva formulació no tingui res a veure amb la fórmula que hem vist per aquestes. Però si que hi ha una dada que tenen en comú i que és el que m'ha fet decidir integrar-les com un sol element i és que en tots dos casos necessitem o disposem d'un eix. En el cas de les forces vectorials per atraure les partícules cap a l'eix i en el cas de les barres per donar la direcció de la força d'atracció o repulsió entre partícules. Així, doncs, la funció vectorial és una força que posa en relació una partícula i una barra atraient la partícula cap a l'eix de la barra. Per això generarà una força radial que varia d'intensitat segons la distància de la partícula seguint el mateix principi de la llei de Hooke en el qual com més lluny està la partícula més forta és l'atracció.

```

5528
5529     x = ((Pts[p1].x.Val) + (Pts[p2].x.Val)) / 2;
5530     y = ((Pts[p1].y.Val) + (Pts[p2].y.Val)) / 2;
5531     z = ((Pts[p1].z.Val) + (Pts[p2].z.Val)) / 2;
5532
5533     Vect.dx = (Pts[p1].x.Val) - (Pts[p2].x.Val);
5534     Vect.dy = (Pts[p1].y.Val) - (Pts[p2].y.Val);
5535     Vect.dz = (Pts[p1].z.Val) - (Pts[p2].z.Val);
5536
5537     Vect.Normalize();
5538
5539     mt = Pts[p1].Mass.Val + Pts[p2].Mass.Val;
5540     m1 = Pts[p1].Mass.Val / mt;
5541     m2 = Pts[p2].Mass.Val / mt;
5542     for (int ii = 0; ii < Lin[i].List.Length; ii++)
5543     {
5544         int p = Lin[i].List[ii];
5545         dd = (Pts[p].x.Val - x) * Vect.dx + (Pts[p].y.Val - y) * Vect.dy + (Pts[p].z.Val - z) * Vect.dz;
5546         xx = x + Vect.dx * dd;
5547         yy = y + Vect.dy * dd;
5548         zz = z + Vect.dz * dd;
5549         xx -= Pts[p].x.Val;
5550         yy -= Pts[p].y.Val;
5551         zz -= Pts[p].z.Val;
5552         mm = mt + Pts[p].Mass.Val;
5553         dd = Math.Sqrt(xx * xx + yy * yy + zz * zz);
5554         if (dd > 0)
5555         {
5556             xx /= dd;
5557             yy /= dd;
5558             zz /= dd;
5559             dd = dd * 0.1f * Fac;
5560             Pts[p].ax += (float)(xx * dd * (mt / mm));
5561             Pts[p].ay += (float)(yy * dd * (mt / mm));
5562             Pts[p].az += (float)(zz * dd * (mt / mm));
5563             Pts[p1].ax -= (float)(xx * dd * (Pts[p].Mass.Val / mm) * m2);
5564             Pts[p1].ay -= (float)(yy * dd * (Pts[p].Mass.Val / mm) * m2);
5565             Pts[p1].az -= (float)(zz * dd * (Pts[p].Mass.Val / mm) * m2);
5566             Pts[p2].ax -= (float)(xx * dd * (Pts[p].Mass.Val / mm) * m1);
5567             Pts[p2].ay -= (float)(yy * dd * (Pts[p].Mass.Val / mm) * m1);
5568             Pts[p2].az -= (float)(zz * dd * (Pts[p].Mass.Val / mm) * m1);
5569         }
5570     }

```

Fig 31. Codi que controla la força que associa les partícules amb les rectes.

El funcionament de la formula es basa en diversos passos en els quals cal obtenir la distància mínima entre una partícula a l'espai i un eix. Per això cal partir d'una sèrie de dades inicials com el centre de la recta, el vector i la longitud d'aquesta, la massa total, etc. Fins a la línia **5531** el sistema calcula el centre de la barra sense tenir en compte la massa de les partícules que l'integren. A continuació cal establir la direcció de la barra (**5533** - **5535**) i després establir la proporció de masses entre les dues partícules que formen la barra (**5539** - **5541**). Aquesta proporció la necessitem perquè el sistema hauria de ser conservatiu i per tant de la mateixa manera que la partícula es veu atreta cap a l'eix també seria necessari que la barra es mogués cap a la partícula de manera que el sistema quedes en equilibri. Un cop hem obtingut aquestes dades podem passar a calcular el vector que ens indiqui la direcció en la qual la partícula ha de moure's per arribar a l'eix de la recta. El criteri consisteix buscar el punt projectat sobre la barra i després establir la direcció segons la posició de la partícula. Gràficament el procés seria:

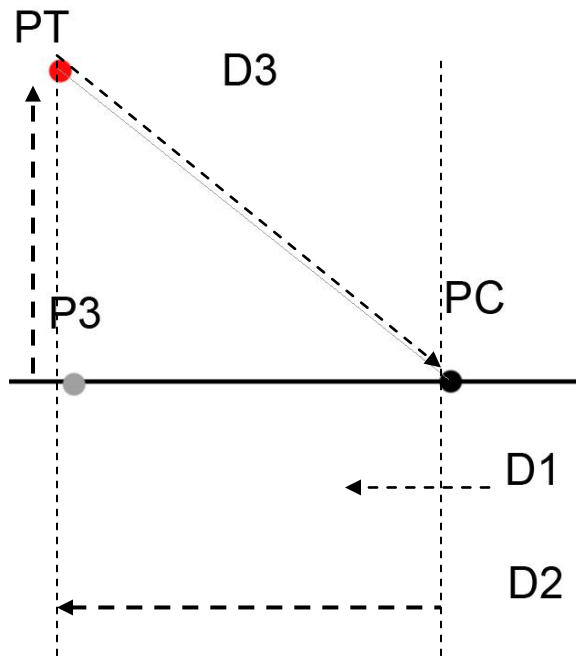


Fig 32. Esquema de funcionament de la força d'atracció entre una partícula i una recta.

A l'esquema podem veure que la direcció D1 correspon al vector unitari de la recta base i D3 és la direcció de la barra que uneix la partícula (vermella) amb el centre de la barra (negre). En multiplicar el vector D1 per D3 obtenim D2 que és la projecció de D3 sobre la barra base. Si sumem el vector D2 al punt central de la barra PC obtenim P3 que és el punt projectat de la partícula PT sobre la recta. Aquest punt P3 permet trobar el vector que uneix l'eix i la partícula de manera que ja sabem en quina direcció cal aplicar-li la força i quina distància mínima tenim entre la barra i la partícula per poder calcular la intensitat.

Aquests càlculs estan representats entre les línies 5545 i 5559 on a la línia 5545 es calcula la longitud del vector D2 i s'emmagatzema a la variable **dd**. De la línia 5546 i la 5548 veiem el càlcul del punt P3 on a les coordenades de PC (x y i z) se li suma el vector D2. Aquest vector que s'obté de multiplicar el vector unitari D1 per la longitud "dd" abans obtinguda. Un cop ja hem calculat el punt P3 ja només ens cal obtenir la direcció que uneix aquest punt amb la partícula cosa que està feta de la línia 5553 a la 5558 del codi. Finalment la intensitat de la força depèn de la variable **dd**, la intensitat de la força controlada pel factor "**Fac**" que ja hem vist en casos anteriors i la "**K**" que en aquest cas val 0.1. La proporció de masses entre el total de la barra "**mt**" (línia 5539) i el total de conjunt "**mm**" (línia 5552) també actua i s'aplica directament quan es sumen les acceleracions per establir quina part de l'empenta s'emporta cadascun. El resultat és el que veiem a sota.

3.2.3 Forces basades en el pla

Aquest és un element bàsic en la majoria de programes de modelatge que permet donar una resposta senzilla al problema de la representació de superfícies en sistemes vectorials. A partir de tres nodes es pot definir una superfície, el contorn de la qual serà un triangle, que es pot enllaçar amb altres plans triangulars formant superfícies complexes com un terreny o una peça

de roba. La connexió de les superfícies amb els sistemes dinàmics però no és tant senzilla com en els casos anteriors ja que la seva definició comporta problemes geomètrics que no tenen una solució directa especialment en treballar amb sistemes de partícules on els nodes que defineixen el pla es mouen lliurement per l'espai, quan és així pot donar-se el cas de que per plans definits per més de tres nodes no es mantingui la Coplanaritat de tots els vèrtex. En aquesta tesis s'ha assumit aquesta contradicció (definir una superfície plana sense tenir tots els nodes sobre el mateix pla) i s'hi ofereix una solució basada en camps de força. Com veurem més endavant en el cas del les malles ens serà molt còmode poder definir plans a les cel·les independentment de la geometria que aquestes puguin tenir i això es pot fer perquè el pla dinàmic s'entén com un camp de força cosa que en sistemes de CAD convencional no es pot plantejar. Exemples de les dificultats que comporten el plans els trobem en els programes que els fan servir profusament, com per exemple SketchUp, i que tenen seriosos problemes en permetre que un pla es pugui definir per més de 3 nodes ja que quan desplacem un dels vèrtexs fora del pla ja no poden assegurar la planicitat del conjunt i es veuen forçats a partir arbitràriament la superfície i subdividint-la en triangles. Altres sistemes de modelatge treballen a partir de sòlids i asseguren la planicitat de les cares en impedir la modificació lliure dels seus vèrtex si no és a partir d'un procés booleà en el qual intervé un altre sòlid. Amb aquest sistema es pot assegurar que cap dels nodes del pla perdi la condició de Coplanaritat però al mateix temps limita les possibilitats del modelatge a una família d'elements concrets que no inclouen curvatures de gaire complexitat. Finalment la manera més extensa de fer servir els plans és a partir de malles que es poden adaptar a tota mena de formes a partir d'enllaçar quantitats innombrables de plans entre ells de manera que vagin definint una superfície de certa complexitat a partir de moltes peces planes. En aquests casos quasi sempre es fan servir cel·les quadrades que es divideixen en diagonal i es representen a partir de dos triangles. Amb aquest mètode es pot treballar amb una certa comoditat sobre les malles sense preocupar-se de la planicitat dels nodes que formen el quadrat.

3.2.3.1 *Descripció*

Normalment els plans es defineixen a partir de tres nodes que formen un triangle amb el qual es poden deduir tota la resta de dades necessàries que són la normal i el centre. El triangle és, doncs, l'únic element bàsic que pot garantir sempre la Coplanaritat dels seus vèrtex perquè és l'expressió mínima de la superfície, i al mateix temps dóna les dades necessàries per definir **un sol** pla de manera que qualsevol element que hagi de definir-se a partir de cares planes ha de fer servir sempre el triangle com a peça bàsica. És important dir que per definir una superfície plana és imprescindible definir un pla, però no tots els plans es corresponen amb superfícies per exemple a nivell de modelatge també trobem altres elements basats en el pla com el pla de

treball que neix del sistema de coordenades, aquest és precisament el que ens permet treballar sobre un sistema tridimensional definit per l'usuari i no en posicions incontrolables a l'espai. Un sistema de coordenades consisteix en tres eixos perpendiculars entre ells i un centre amb el que definim tres plans (pla xy , xz i yz). Per tant les superfícies contenen plans però els plans no sempre descriuen una superfície. En el cas de les superfícies es defineixen per una sèrie de nodes a l'espai, que no cal que siguin coplanaris entre ells però que han de donar-se en el mateix ordre en el qual volem que es defineixi el contorn ja que el sistema no pot reordenar els nodes per donar un aspecte coherent al contorn del pla. A partir d'aquestes dades inicials el sistema calcula un pla mig i genera una tensió que té per finalitat portar tots els vèrtex a altura zero respecte del pla.

3.2.3.2 *Generació*

A partir d'un contorn qualsevol el programa pot generar un pla i per tant només amb donar més de dos nodes a l'espai en tenim prou. Aquests nodes poden ser donats en qualsevol ordre i qualsevol posició, l'únic que cal tenir en compte és que en el mateix ordre en el qual es donen aquests nodes es dibuixarà després el contorn de la figura de tal manera que cal fer-ho en el mateix ordre que volem que es representi. De no ser així el programa ens dibuixarà el pla de manera que les línies de contorn creuaran la figura. Això no acostuma a donar bons resultats. També és possible generar eixos de coordenades i en aquest cas el que hem de fer és donar tres nodes qualsevol sent el primer l'origen de coordenades i deduint els eixos a partir dels altres.

3.2.3.3 *Força basada en el pla*

A causa de la més que probable possibilitat de que els nodes que defineixen un pla deixin de ser coplanaris en el moment que siguin més de tres ha calgut implementar una força que compensi aquest fet tot intentant que els vèrtex desviats tornin a la superfície del mateix. Per al càlcul d'aquesta força el primer que ens caldrà saber és el centre de masses que el considerarem el centre del pla cosa que és un càlcul relativament trivial. Però el problema sorgeix quan a partir de vèrtex no coplanaris volem calcular la direcció de la normal del pla cosa que no sembla possible. En aquest cas el que fem és buscar una normal mitja de tot el conjunt fent servir un mecanisme en el qual generant triangles formats per dos nodes del contorn i el centròide en calculem la normal, i finalment fem la suma promig de totes les normals obtingudes a partir de tots els triangles. Així, doncs, a partir d'un llistat de nodes qualsevol es pot generar un pla mig format per

el centre de masses i la normal de tots triangles formats pel centre i els segments del contorn i un cop tenim aquest pla mig podem passar a mesurar la desviació dels vèrtex respecte d'aquest.

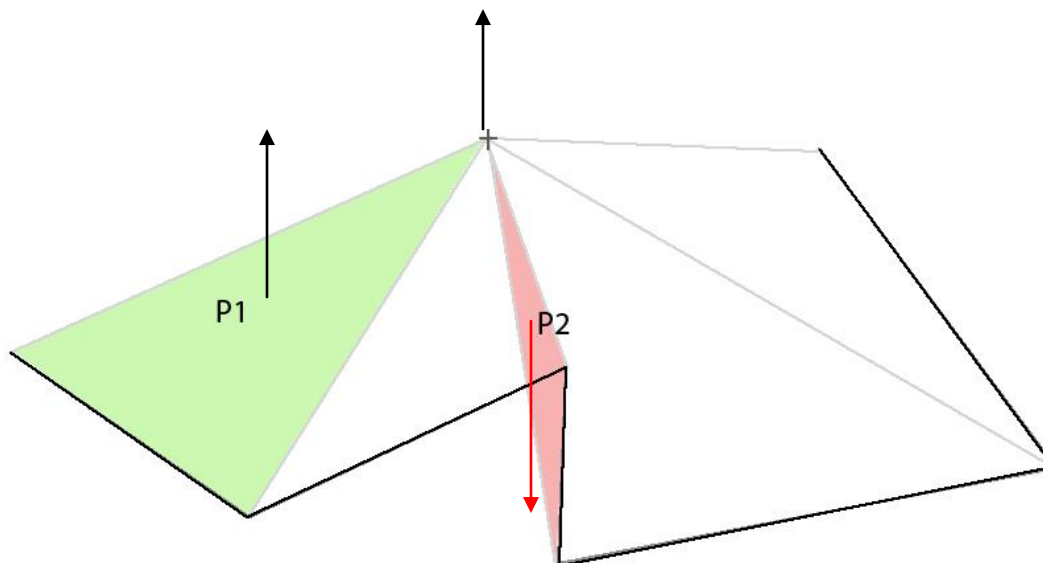


Fig 33. A la figura veiem un típic exemple de normal que no respecta el sentit general de les altres normals, la causa d'aquest problema es troba en el fet de que els nodes de vora són agafats en el sentit invers quan apareix alguna mena de retorn en el contorn.

Apareixen però matisos important que cal solucionar i que compliquen el codi amb el que calculem l'eix ja que quan aquestes normals es van sumant per generar un vector suma de totes elles apareix una complicació important en descobrir que no tots els eixos surten en el mateix sentit de manera que alguns són "positius" i altres "negatius" tot i que la seva direcció sigui coincident. En aquest punt podríem estar temptats de pensar que fent el valor absolut del vector el problema quedaria solucionat però això no és així perquè una direcció alterna valors positius i negatius de manera que fent-los tots positius la direcció canvia. Per solucionar el problema cal, doncs, multiplicar el vector parcial pel vector suma, i si el resultat surt negatiu llavors sabem que aquell vector no està respectant el sentit general i en comptes de sumar s'ha de restar (o bé cal canviar-li el sentit). Amb aquesta senzilla solució podem obtenir l'eix mig del conjunt sense més dificultats de manera que ens quedi un centroide i una normal mitja.

A continuació ens cal fer el càlcul per obtenir la desviació dels vèrtex respecte del pla, que és similar al que hem vist en el cas de la força d'atracció entre una recta i un vèrtex i pot ser descrit com el producte escalar entre el vector que uneix el centre del pla amb la partícula i la normal del pla. Aquesta força augmentarà més i més la tensió a mesura que les desviacions augmentin de manera que limitarà el marge de moviment de les partícules al pla que les conté. De nou, doncs, apareixerà la llei de Hooke com un dels components teòrics de la formula.

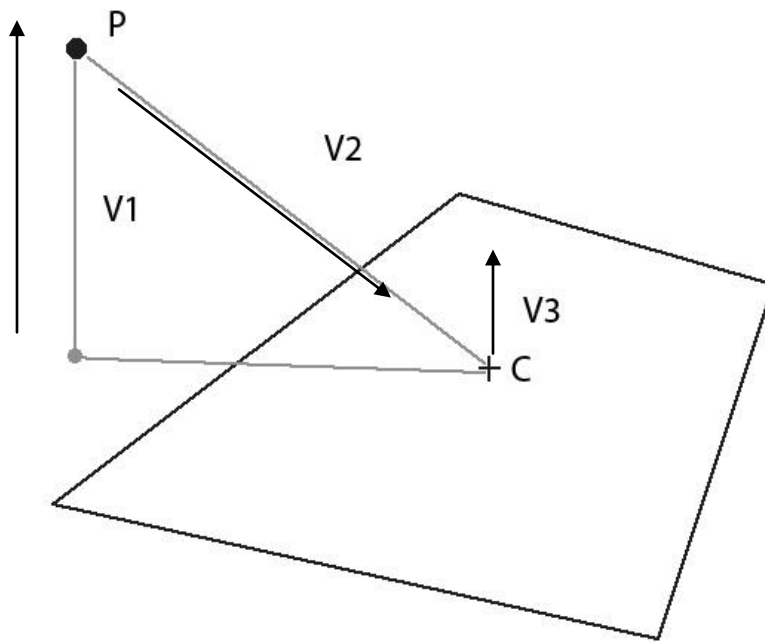


Fig 34. Tal com veiem a la figura l'eix del pla seria el vector unitari $V3$ que en multiplicar-se per $V2$ dona el vector $V1$ que correspon a la distància entre el node P i el pla, i que anirà en la direcció de $V1$.

La formula amb la qual obtenim la magnitud de $V1$ podria ser descrita com:

$$Dist = Dx \times NorX + Dy \times NorY + Dz \times NorZ$$

En la qual $Dist$ és la distància al pla de la partícula i correspondria a la longitud de $V1$, Dx, Dy, Dz el vector que uneix el centre del pla amb la partícula i que correspondria a $V2$ de l'esquema, i $NorX, NorY, NorZ$ seria la normal del pla que es correspondria amb $V3$. Fet això tenim la direcció de l'impuls que es correspondrà amb la normal del pla i la distància del node al pla que necessitem per calcular la intensitat. L'algorisme, doncs, fa servir aquesta distància mitjançant la llei de Hooke per derivar la intensitat de l'acció segons:

$$f = -k \times \Delta x$$

Sent f la força d'atracció al pla, $-K$ la constant d'elasticitat i Δx la distància al pla. Tenint en compte que en el càlcul de Δx la X_0 sempre és 0 la distància s'aplica directament. La direcció de la força serà la de la normal al pla ja que els nodes sempre acceleraran en perpendicular a aquest. A mesura que els nodes es vagin desplaçant el pla anirà canviant segons el desplaçament d'aquests de tal manera que hi haurà un joc recíproc entre el pla i els nodes que el componen.

3.2.3.4 codi

Repassant el codi que calcula l'acceleració dels vèrtex quan es separen del pla podem veure com s'ha aplicat aquest mecanisme de càlcul en el llenguatge de programació. El codi descriu aquest procés per cada element associat al pla. A la línia **5712** comença el càlcul pròpiament dit on desem a la variable "dd" el producte escalar obtingut de multiplicar l'eix del pla "Pla[i].Nx" amb el vector uneix la partícula amb el centre del pla "Pts[p1].x - Pla[i].x". El resultat és la distància del node al pla i aquesta ens servirà per donar la intensitat apropiada a la força que actuarà sobre la partícula. De les línies **5715** a la **5717** veiem com s'aplica aquesta força sobre la partícula, càlcul en el qual participen la direcció de la normal del pla "Pla[i].Nx", la distància "dd", el factor d'intensitat "Fac" i la "K" que té valor "0.05". Les condicions que apareixen a la línia **5713** són mecanismes amb els quals avaluo si el node està per sobre o per sota del marge de tolerància del pla. Si està per sota del valor de tolerància no cal operar. Això ens permet treballar amb marges de tolerància per als plans que afectaran directament al resultat del conjunt, cosa que ens permet aprofitar de forma òptima aquests marges de cara a fer formes més arriscades.

```

5709| for (int ii = 0; ii < Pla[i].List.Length; ii++)
5710| {
5711|     p1 = Pla[i].List[ii];
5712|     dd = ((Pts[p1].x.Val - Pla[i].X) * Pla[i].Nx + (Pts[p1].y.Val - Pla[i].Y) * Pla[i].Ny + (Pts[p1].z.Val - Pla[i].Z) * Pla[i].Nz);
5713|     if (Math.Abs(dd / Pla[i].CurrentArea) > Pla[i].MaxDesv.Val & Operate)
5714|     {
5715|         Pts[p1].ax -= (Pla[i].Nx * dd * 0.05f * Fac);
5716|         Pts[p1].ay -= (Pla[i].Ny * dd * 0.05f * Fac);
5717|         Pts[p1].az -= (Pla[i].Nz * dd * 0.05f * Fac);
5718|     }
5719|     Pts[p1].Nx += (float)Pla[i].Nx;
5720|     Pts[p1].Ny += (float)Pla[i].Ny;
5721|     Pts[p1].Nz += (float)Pla[i].Nz;
5722| }

```

Fig 35. Codi que descriu l'aplicació de la força d'atracció del vèrtex cap al pla que el conté.

En aquest cas el sistema no és conservatiu perquè això complicaria els càlculs, doncs, les reaccions que produeixen els nodes no es poden aplicar directament sobre el pla sinó sobre les partícules que el defineixen i això incrementa en excés el temps de càlcul, tot i això és possible fer que el sistema sigui conservatiu i és un afegit que volem agregar més endavant.

3.2.4 Forces angulars

Per primer cop ens trobem davant d'una força que no té una representació directa com element geomètric ni arquitectònic i això la fa que sigui més abstracta tant a nivell conceptual com en la

seva representació geomètrica. El control angular dels elements és un pas essencial de cara a definir geometries que tinguin una certa capacitat de descripció i al mateix temps que puguin ser dinàmiques. Aquest sistema permet fixar els angles d'un element perquè quan es mogui retengui aquesta propietat independentment de com canviïn les condicions al seu entorn i per fer-ho ha d'actuar d'una manera dinàmica que s'adapti a totes les possibles situacions que poden donar-se. Per altra banda hi ha un fet molt important i és que se li dóna entitat a una relació geomètrica i per tant deixa de ser un element conceptual per passar a ser un element actiu que modifica el model. En els sistemes de CAD convencionals quan volem fer una recta tangent o volem generar una recta paral·lela hem de recórrer a sistemes que ens permetin localitzar el punt exacte on es donarà aquesta condició per acte seguit dibuixar la recta per aquell punt. En aquest procés la condició geomètrica és en realitat un fet puntual que desapareix en el moment que modifiquem la recta o el punt de tangència i que només s'ha calculat quan l'ordinador buscava aquell punt per facilitar-li a l'usuari. Però si entenem la condició geomètrica com un element en si, un objecte actiu que està contínuament actuant i que a més té un quadre de propietats amb el que pot modificar-se podem preveure que potencialment no només facilitarà la feina de modificació del model sinó que ens permetrà accedir a geometries molt més complexes sense perdre'n el control o a delegar més feina mecànica en el sistema digital sense carregar-nos nosaltres mateixos. Amb aquest objectiu es generen aquests elements que poden ser entesos com a relacions geomètriques actives.

3.2.4.1 *Generació*

Per definir una relació angular ens cal facilitar dues rectes, o el que és el mateix quatre punts. Aquestes defineixen un pla sobre el que es mesurarà l'angle que formen. Aquest angle podrà ser modificat a partir del quadre de propietats o establint algun valor comú com 45° o 90°. Si bé podria semblar que amb tres punts hi ha suficient per definir un pla, en aquests cas cal tenir en compte que treballem amb rectes que estan l'espai i que per tant potser es tallen o potser només es creuen. Cal entendre, doncs, que és un mecanisme preparat per actuar en 3 dimensions i no únicament sobre el pla.

3.2.4.2 *Quadre de propietats*

En el cas de la força angular les propietats no han estat desenvolupades a fons de manera que únicament podem dominar la intensitat de la força tal com veurem en el codi amb el factor *Fac*. No ha estat encara implementada la possibilitat de manipular el valor angular inicial cosa que

podria ser necessària. Per altra banda en les experiències que hem anat fent tampoc ens han requerit gaire més capacitat de control per tant sembla que aquesta força requereixi de gaires variables per al seu control apropiat.

3.2.4.3 Descripció

Les funcions angulars són capaces de mantenir tot un seguit de rectes amb angles determinats independentment de les modificacions puntuals que pateixin sense que l'usuari hagi de preocupar-se'n. Per fer-ho es basaran en un camp de força que generi una tensió angular associada a un eix. Per mantenir aquesta relació angular fixada es guarda l'angle inicial i en el moment que la funció detecta un angle major o menor a l'angle esmentat es genera una força en el sentit invers per corregir-ho. La força esmentada haurà d'actuar de manera que es generi un gir invers a la deformació patida i que compensi la desviació respecte el valor inicial.

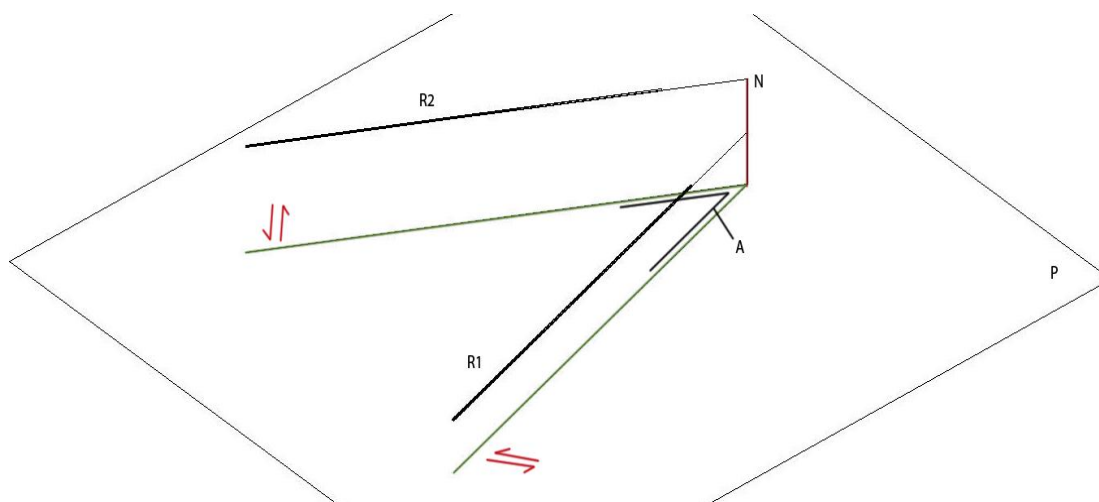


Fig 36. Projecció sobre el pla format per dos rectes a l'espai i de l'angle entre elles.

De cara al càlcul aquesta funció requereix la normal del pla format per les dues rectes que es posen relació i l'angle inicial a partir del qual establir quin és el punt d'equilibri. Tal com veiem en la figura, sobre el pla es projecten les dues rectes i s'hi pot veure clarament l'angle que formen, tot i això no cal calcular l'angle sobre les rectes projectades sinó que es pot fer directament com a producte escalar de les dues rectes a l'espai. Aquest producte donarà valors que van de 0 a 1 i comparats amb l'estat inicial ens permet avaluar quina diferència angular s'ha produït (sempre en base a valors entre 0 i 1). Les forces de reacció que intentaran compensar aquest moviment seran vectors paral·lels al pla esmentat i que mouran els extrems de la recta perquè girin en un sentit o un altre. Per al càlcul de les forces si que necessitem el pla format per les dues rectes,

o com a mínim la seva normal. En la figura podem veure com les rectes $R1$ i $R2$ es projecten a través de la normal N al pla P que hem definit a partir de les dues rectes. Per calcular la direcció de les reaccions ens cal trobar el vector perpendicular a $N - R1$ i a $N - R2$ de manera que ja sabrem els sentits de la reacció. Aquest procés es pot realitzar de manera relativament eficient amb un sistema de computació perquè de fet només hem de calcular tres vectors nous (N , la reacció de $R1$ i la reacció de $R2$), i tot això ho podem fer només a partir dels vectors coneguts $R1$ i $R2$ cosa que ens permet tenir centenars de relacions angulars en un mateix model. En aquest sentit es poden combinar aquestes relacions angulars per simular estructures amb nusos rígids i es poden plantejar tensions associades als nodes de cara a futures aplicacions que mostrin un esquema de les tensions angulars aproximades per a una estructura en temps real. Així, doncs, amb aquest sistema es poden simular estructures de nusos rígids, superfícies amb una morfologia constant però una longitud variable i altres elements que requereixin relacions angulars estables. En el cas concret dels panells permet mantenir les deformacions d'un pla dins un marge limitat de possibilitats que no incloguin formes irregulars amb angles arbitraris. Aquesta condició és essencial de cara a fer viables certes propostes ja que les formes irregulars molts cops encareixen i compliquen la construcció. Tenint per ideal construir el màxim amb el mínim de peces l'intentaré assolir a aquest objectiu a partir de petits avenços tal com regularitzar angles, establir condicions de planicitat, etc.

3.2.4.4 Codi

```

5808      p1 = Lin[L1].p1;
5809      p2 = Lin[L1].p2;
5810      p3 = Lin[L2].p1;
5811      p4 = Lin[L2].p2;
5812
5813      Vect1.dx = Pts[p1].x.Val - Pts[p2].x.Val;
5814      Vect1.dy = Pts[p1].y.Val - Pts[p2].y.Val;
5815      Vect1.dz = Pts[p1].z.Val - Pts[p2].z.Val;
5816      Vect2.dx = Pts[p3].x.Val - Pts[p4].x.Val;
5817      Vect2.dy = Pts[p3].y.Val - Pts[p4].y.Val;
5818      Vect2.dz = Pts[p3].z.Val - Pts[p4].z.Val;
5819      Vect1.Normalize();
5820      Vect2.Normalize();
5821
5822      dd1 = Vect1.dx * Vect2.dx + Vect1.dy * Vect2.dy + Vect1.dz * Vect2.dz;
5823      FuncAn[i].CurrentAng = dd1;
5824      Fc = -Fac * Math.Abs(dd1 - FuncAn[i].Ang);
5825      if (dd1 > FuncAn[i].Ang) { Fc = -Fc; }
5826      Fc *= 0.1;
5827
5828      Vec3 = GenerateNormals(Vect1, Vect2);
5829      Vec1 = GenerateNormals(Vect1, Vec3);
5830      Vec2 = GenerateNormals(Vect2, Vec3);

```

Fig 37. Codi que descriu l'aplicació del moviment de gir angular sobre dues barres.

La part més complexa del càlcul consisteix en aconseguir obtenir les direccions de les reaccions de cara a poder aplicar la força que reacciona al desplaçament angular. Per aquesta finalitat hem

generat un funció auxiliar del programa que a partir de dos vectors en calcula el vector normal. Amb aquesta funció puc obtenir ràpidament les direccions de les reaccions sense complicar innecessàriament el codi. El primer que busco és la direcció de les rectes sobre les quals aplico la relació angular cosa que es pot veure de la línia **5813** a la **5818**, acte seguit els transformo en vectors unitaris tal com es veu a la línia **5819** i **5820**. Fet això calculem el producte escalar de tots dos vectors per establir l'angle actual i poder-lo comparar amb l'angle inicial tal com fem a la línia **5822**. Un cop fet això trobo la normal dels tots dos tal com es veu a la línia **5828**. I a partir de la normal i els mateixos vectors calculem les direccions de la reacció a les línies **5829** i **5830**. Pel camí hem anat deixant sense comentar alguns passos que corresponent al càlcul de la intensitat segons la diferència angular, aquest codi encara està en desenvolupament ja que tot i ser funcional encara genera algunes inestabilitats. En qualsevol veient el codi ens adonem de que realment és un procés molt senzill i aquesta propietat és fonamental per a treballar en temps real.

3.2.5 Longituds iguals entre rectes

Un altre de les funcions que podríem considerar com "relació geomètrica activa" és la funció d'equidistància que permet establir que un conjunt de rectes tinguin el mateix valor de longitud. Amb aquesta funció volem aconseguir una certa uniformitat en el model, sent aquest un objectiu desitjable a nivell constructiu i econòmic que permetria fer mes assequibles alguns dissenys. Aquest tema, (el de la uniformització i racionalització de formes complexes), és extremadament difícil de manera que intento dividir aquesta tasca en petits problemes de fàcil solució que gradualment vagin donant més homogeneïtat a les diferents parts del model. L'objectiu final és reduir al mínim les variacions entre les peces que formen un cos ja es tracti de variacions de superfície, d'angle o de longitud de manera que cal atacar cadascun d'aquests aspectes per separat. Aquesta funció inicialment s'ha aplicat a les rectes com una manera de fer que totes tinguessin la mateixa longitud.

3.2.5.1 *Generació*

Només necessitem indicar un llistat de rectes perquè la funció actuï, sense que aquestes hagin de seguir un ordre determinat ni cap condició especial. A diferència del que passava en el cas dels plans l'ordre és completament indiferent.

3.2.5.2 Descripció

Per fer que un seguit de rectes mesurin el mateix cal traduir aquesta condició geomètrica a un camp de força que iguali les propietats de longitud base de diverses rectes. En aquest sentit hem plantejat una funció que unifica les longituds d'un llistat de rectes a un valor mig de manera que totes tendeixen a mesurar el mateix. Si recordem la funció dinàmica de la recta recordarem que és feia servir una distància base a partir de la qual comparar la distancia actual i generar la força expansiva o retroactiva que permetés recuperar la longitud inicial. Com que el que es modifica és la distància base automàticament apareixeran forces de retracció o expansió que ajustaran de nou la longitud de la recta. Si bé la tendència general és a mesurar el mateix que la longitud base aquest objectiu no s'assolirà al 100% sinó amb un marge d'error que variarà segons les tensions a les quals es vegi sotmesa la recta. Tot i aquesta deficiència el resultat acostuma a ser prou precís sempre i quan se li dediqui un temps mínim a depurar el model per assegurar-se que les diferents accions no entrin en contradicció mútua.

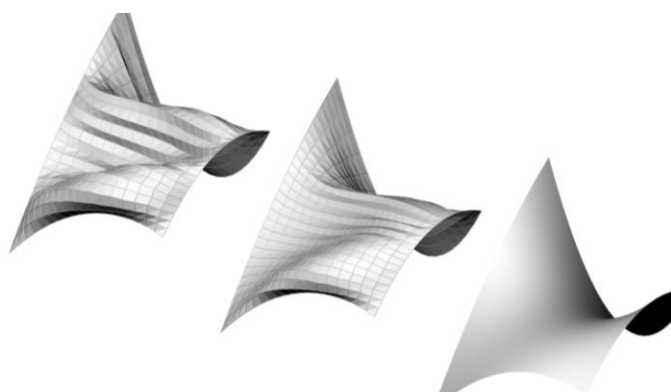


Fig 38. Exemple de superfícies NURBS amb una malla associada a la qual se li han fixat els angles dels panells i s'han uniformitzat les longituds de les barres. A la part inferior es pot veure els diferents estadis que ha seguit la malla, des de la superfície NURBS original fins a la forma final.

El panell de propietats d'aquesta funció, de la mateixa manera que el cas anterior, no presenta una excessiva complexitat ja que fora de la intensitat no han aparegut més factors que requereixin manipulació directa de cara a obtenir resultats coherents. Tot i això si que hi ha un aspecte que ha calgut desenvolupar i que en general pot ser que sigui essencial de cara a la utilització d'aquest tipus de funció i és que, de manera purament informativa, el sistema mostri a l'usuari quantes variants s'han generat en el conjunt, això vol dir que ens interessaria saber un cop que hem aplicat la funció d'uniformització quin efecte ha tingut sobre el model. Recordem que els sistemes dinàmics mai són exactes sinó que aproximen el resultat poc a poc. En aquest sentit quan uniformitzem les longituds aquestes tendiran a ser iguals però no ho seran del tot de manera que serà necessari poder avaluar quin marge estan deixant les peces respecte el valor assignat. Això és important de cara a poder avaluar l'èxit de la funció a l'hora d'establir una certa uniformitat al model i saber si és construïble o no.

Tal com es veu a l'exemple en uniformitzar les longituds s'ha donat com a resultat una forma dinàmica que intenta adaptar-se a la superfície corba a partir de peces que volen ser més o

menys regulars. Òbviament hi ha diverses constriccions geomètriques que són contradictòries de manera que es donen fenòmens peculiars com arrugues i revinguts als extrems de la malla a causa del fet de que és geomètricament impossible que totes les barres siguin d'igual longitud i estiguin sobre la superfície NURBS (veure capítol 3.2.7) i al mateix temps formin panells plans. Com que aquestes condicions no són possibles el sistema aproxima una possible solució que és arrugar la superfície. Fixem-nos que comença a aparèixer una de les principals capacitats dels sistemes dinàmics que és l'adaptació.

3.2.5.3 Codi

```

5863     if (FuncEq[i].Tip == 0)
5864     {
5865         if (FuncEq[i].List != null)
5866         {
5867             float Len = 0;
5868             for (int ii = 0; ii < FuncEq[i].List.Length; ii++)
5869             {
5870                 L1 = FuncEq[i].List[ii];
5871                 if (L1 > -1) { Len += Lin[L1].CurrentDist / FuncEq[i].List.Length; }
5872             }
5873             for (int ii = 0; ii < FuncEq[i].List.Length; ii++)
5874             {
5875                 L1 = FuncEq[i].List[ii];
5876                 if (L1 > -1 & L1 < Nln) { Lin[L1].Length.Val = Len * Fac + Lin[L1].Length.Val * (1 - Fac); }
5877             }
5878         }
5879     }

```

Fig 39. Codi d'aplicació de la funció que iguala la longitud de les rectes.

A diferència del que hem observat en els casos anteriors el codi d'aquesta funció no executa cap equació de moviment sinó que únicament assigna un valor a la longitud base de les rectes. Per aquesta raó és en realitat molt senzilla i no aplica cap principi nou ni requereix de cap esquema. Per igualar el valor de les longituds el primer que fa és buscar el valor mig, cosa que podem veure entre les línies **5868** i **5872**, concretament a la línia **5871** es va sumant la longitud de les rectes del llistat "FuncEq[i].List" dividit pel nombre de rectes de manera que la suma final és igual a la longitud mitja. De la línia **5873** a la **5877** l'únic que fem és assignar el valor a cadascuna de les rectes del llistat.

3.2.6 Corbes NURBS

En la majoria de programes de CAD apareixen estratègies relativament variades per poder representar corbes. Les més bàsiques fan servir polilínies que aproximen una corba a partir de la discretització d'aquesta en petits segments rectes que per nombre i densitat semblen una corba sense ser-ho realment. Aquest mecanisme s'ha mostrat relativament ineficaç a l'hora de treballar

amb conceptes geomètrics com les tangències que requereixen de curvatura real poder-se definir amb precisió. Una segona solució va ser generar diverses classes d'elements que responguessin a un ventall relativament significatiu de tipus de curvatures com circumferències, paràboles, el·lipses i hipèrboles. Però aquest model és extremadament rígid i no permet passar d'una corba d'un tipus a un altre, cosa que comporta certs inconvenients. Seria, doncs, fonamental disposar d'un element unitari al voltant del qual unificar tots els casos sense perdre precisió. Aquestes propietats són molt desitjades en programació ja que simplifiquen molt la confecció del programa i permeten fer-lo més genèric de manera que arribi a un públic molt més extens i per tant la introducció de les corbes NURBS¹⁶³ ha estat fonamental per afrontar el problema de les corbes i les superfícies lliures en els CAD. Les NURBS van néixer en formular-se aquest mateix problema als anys 50, llavors els enginyers Pierre Bézier i Paul de Casteljaou van començar a desenvolupar paral·lelament un sistema de formulació que permetés la definició de superfícies lliures de manera exacta. En ser Bézier el primer en publicar els resultats les SPLINES van rebre el nom de SPLINES de Bézier i les NURBS no són mes que una generalització de les SPLINES de Bézier. Aquesta aproximació es basa en unificar trams tangents de corbes de BÉZIER per definir un contorn continu que pot ser tant lineal (grau 1) com corbat (grau >1). El més important és que aquesta mena de corbes poden imitar quasi a la perfecció la recta, el cercle, l'el·lipse, la paràbola i la hipèrbola a més de molts altres tipus de corbes que no es podrien classificar en aquest àmbit.

3.2.6.1 *Descripció*

Corbes de Bézier:

Les corbes de Bézier parteixen d'una sèrie de rectes de control a partir de les quals s'interpola la posició dels punts que defineixen la corba. Aquesta interpolació pot tenir diversos graus depenent de quantes corbes es facin servir per a la interpolació. El procés d'obtenció d'un punt a partir de les rectes de control es veu exemplificat a la figura i mostra com a partir d'un punt situat a una proporció respecte l'inici de la primera recta, que s'uneix amb un punt situat a la mateixa proporció de l'inici de la segona recta, unint-los obtenim una tercera recta. Agafant de nou un punt sobre aquesta tercera recta a la mateixa proporció que els anteriors obtenim el punt de la corba. El mateix procés es repeteix per a una nova proporció, fins a formar un seguit de punts que en conjunt donen lloc a una corba.

¹⁶³ Les, P., "On NURBS: A Survey", *Computer Graphics and Applications*, 1991, IEEE, Volume: 11 Issue: 1 Page(s): 55 - 71

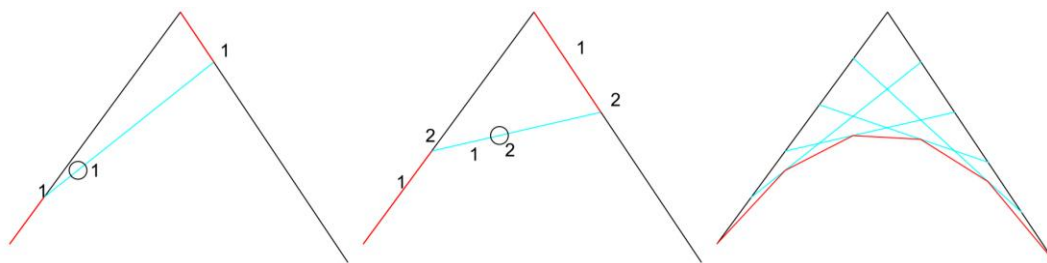


Fig 40. Esquema de construcció d'una corba de BÉZIER. A la figura de l'esquerra es mostra el procés per obtenir el primer punt, al mig l'obtenció del segon punt i a la dreta el resultat final amb 5 punts d'interpolació.

L'exemple està fet per una corba de Bézier de 2^o grau en la qual intervien dues rectes de control. Efectivament el grau de la corba ens indica quantes rectes han intervingut en la generació d'aquesta y el procés és sempre similar, produint trams de recta interpolats fins arribar al punt final situat sobre la nostra corba.

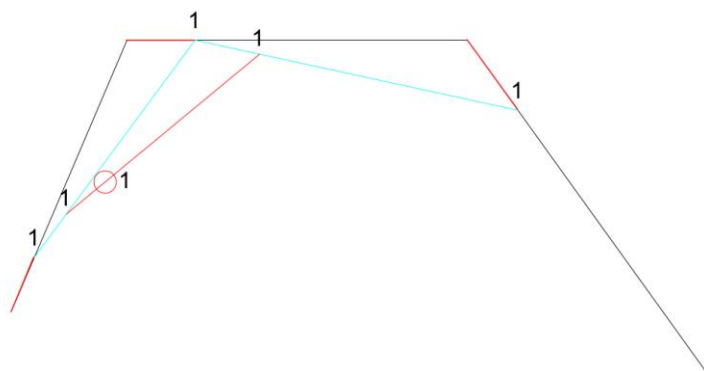


Fig 41. Obtenció d'un punt de la corba de BÉZIER a partir de tres rectes. A la figura podem veure com funcionaria el procés per una corba de 3^o grau, en la qual primer es generen uns punts interpolats a les 3 rectes inicials amb les obtenim dues rectes, després repetim el procés per les dues rectes obtenint dues rectes, i finalment obtenim el punt final sobre la corba.

Corbes NURBS:

Les corbes NURBS són conjunts de corbes de Bézier tangents entre si que donen la impressió de ser una única corba. Per definir una NURBS ens calen una sèrie de punts que permetin establir un polígon de control. A partir d'aquest polígon es defineixen els diferents trams de corba de BÉZIER que formaran l'element tenint en compte el grau i el nombre de trams de la NURBS. Ens cal, doncs, un processat inicial per determinar els punts de control de cada corba de BÉZIER tenint en compte que han de ser tangents entre si i que vindran derivats dels punts de control principals. Amb aquest punts podrem dibuixar les diferents corbes que composen la NURBS mantenint una relació de tangència entre les diferents corbes de BÉZIER de manera que doni la impressió d'un element continu. Per trobar un punt sobre la corba ens cal donar un valor U que ens indicarà en quin punt de la corba estem. Recordem que quan definíem les corbes de Bézier fèiem servir una mateixa proporció per acabar trobant el punt interpolat de la corba. Aquesta

proporció varia entre 0 i 1 sent 0 l'extrem inicial i 1 l'extrem final, i tots els valors entre 0 i 1 correspondran als diferents punts de la corba.

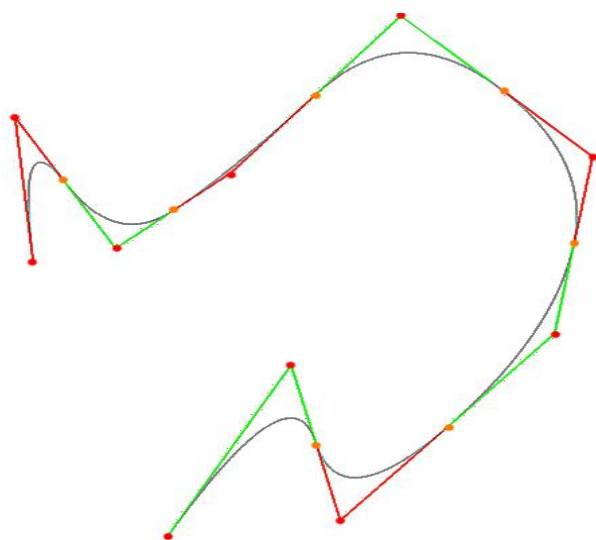


Fig 42. Esquema de corba NURBS formada per diferents trams de corbes de BÉZIER tangents entre si. Les rectes vermelles i verdes són polígons de control de corbes de BÉZIER. Els punts taronges són punts interpolats per tal de fer les corbes de BÉZIER tangents entre si, mentre que els punts vermells són punts de control de la NURBS.

En el cas de les corbes NURBS aquesta proporció s'extrapola a tot el conjunt de corbes de manera que 0 és l'extrem inicial de la primera corba i 1 l'extrem final de la última corba i per tant tots els valors entre mig aniran definint els diferents punts sobre cadascuna de les corbes de Bézier que componen el conjunt. Excepte el primer i l'últim punt la corba no passarà pels punts de control de manera que modificar-la amb precisió és fa molt difícil. Aquest ha estat un dels principals problemes que ha plantejat aquest model i que també es repetirà en el cas de les superfícies NURBS. Tot i això la gran flexibilitat que suposa el seu ús fa que la modificació manual quedi en segon terme i per tant sigui un problema secundari però real.

3.2.6.2 Forces basades en la corba NURBS

L'aplicació de les NURBS en el modelatge fa ja molts anys que s'està duent a terme i per tant és una classe de geometria ja molt establerta en certs àmbits. Calia, doncs, implementar aquesta mena d'objectes en el programa però no era evident de quina manera podien fer-ho perquè actuessin de manera dinàmica sobre els altres elements. Com el control de les corbes NURBS es fa a partir d'uns punts que no es corresponen exactament amb els de l'objecte geomètric descrit la seva manipulació no és gens intuïtiva de manera que establir relacions dinàmiques amb els punts de control no va semblar una bona idea així que va fer falta plantejar una nova estratègia. La idea que finalment hem aplicat és l'adhesió d'altres elements a la corba NURBS,

deixant aquesta únicament com un element estàtic que faci d'esquelet. Per fer-ho ha calgut generar dues classes de partícules, unes de virtuals que es mouran per la corba i que faran d'intermediàries i unes altres reals que es mouran per l'espai i que les hem descrit anteriorment. Aquesta estratègia ha resultat relativament eficaç i ha permès solucionar una gran varietat de casos amb un únic sistema. Tenint en compte que els punts d'una corba NURBS es defineixen a partir d'un valor U (amb valors entre 0 i 1) que ens indica en quina posició de la corba estem, nosaltres podem generar una partícula que es mogui dins de la corba modificant el seu valor de U i que tingui una velocitat i una acceleració que li facin canviar la seva posició endavant o endarrere. Com que el sistema de corbes NURBS ens permet obtenir la posició a l'espai i la tangent d'un punt només a partir del seu valor U podem calcular la posició del punt de la corba i relacionar-lo amb una partícula a l'espai per mitja d'una força d'adhesió i després transformar les accions rebudes pel punt de la corba en valors de velocitat en la dimensió U . Per fer-ho ens cal multiplicar el vector que uneix la posició a l'espai de les dues partícules $F1$ per la tangent de la corba en el punt U de manera que obtenim un valor unidimensional que ens indica amb quina intensitat estira la partícula real a la partícula virtual $F2$.

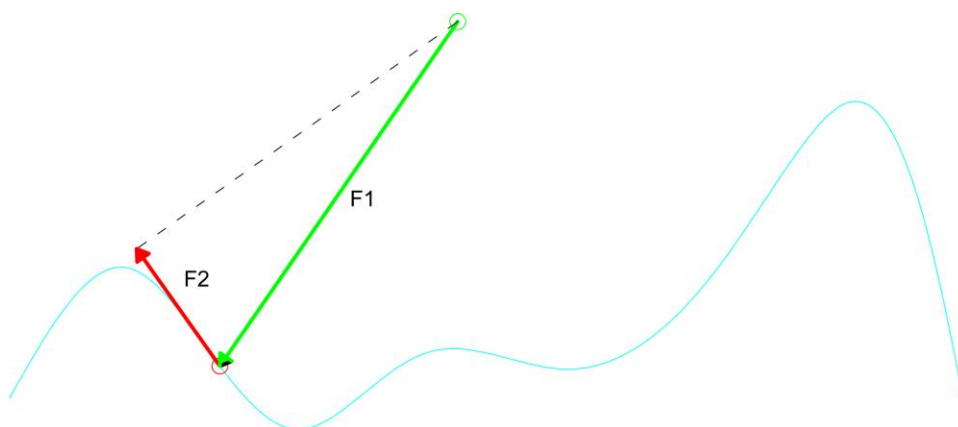


Fig 43. Esquema de relació entre una partícula i una partícula virtual sobre una corba NURBS. Sent $F1$ l'acció que rep la partícula real i $F2$ l'acció sobre la partícula virtual

Aquesta intensitat es transforma a un valor d'acceleració que es sumarà a una velocitat en U que serà positiva o negativa segons el sentit de la tangent i que farà avançar o recular la partícula virtual. Mentre aquesta partícula virtual es va desplaçant per la corba, la partícula real es desplaçarà cap a ella fent servir el mateix vector que els uneix com a direcció $F2$ i establint una atracció fixada. D'aquesta manera ambdues partícules tendiran a convergir en un únic punt de trobada.

En aquesta funció cinètica l'element de control principal serà la geometria de la corba per la qual es mou la partícula virtual. Segons el grau d'aquesta i la forma general, la relació entre les partícules variarà. Hi ha moltes casuístiques en la morfologia de les corbes NURBS en les quals pot ser que quedin bloquejades o que no convergeixin correctament. Especialment il·lustratiu és el cas dels retorns en els quals les partícules virtuals queden bloquejades. En aquest cas en ser

un sistema purament cinètic i no analític no hi ha altra manera de que el sistema pugui preveure que més endavant hi ha un punt més proper encara que això impliqui avançar en sentit contrari al punt recercat. En aquest sentit cal desplaçar el punt a mà per evitar aquesta posició.

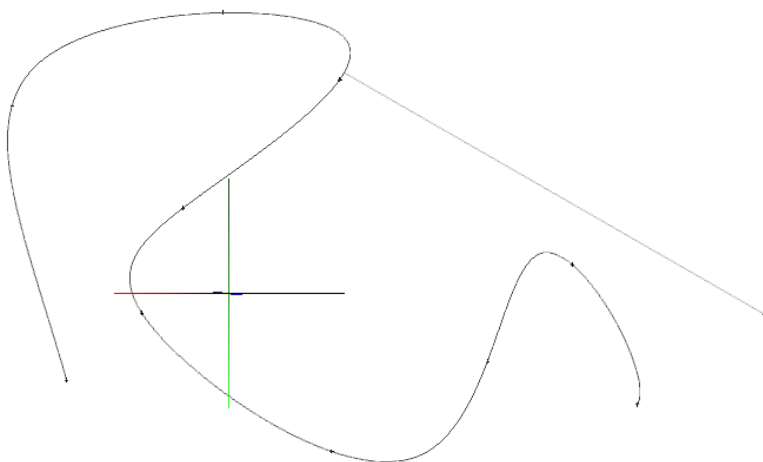


Fig 44. Il·lustració que mostra com un punt ha quedat bloquejat a causa d'un retorn en la corba NURBS.

Es manté també el concepte d'intensitat en el sistema de control d'aquesta força cosa que permet regular la seva interacció amb el conjunt. Fora d'això el que podem controlar és el grau de la corba cosa que ens permet tenir curvatures més o menys suaus. El sistema de control és molt immediat i no ha calgut, doncs, aplicar grans complicacions en les seves propietats ja que és un força molt efectiva i és difícil que entri en contradicció immediata amb altres camps. Més complicat és el següent cas en el qual aplicarem un principi similar per a les superfícies NURBS.

3.2.6.3 Generació

Per definir una corba NURBS només cal un llistat de punts donats en qualsevol ordre. Llavors podrem veure com la corba s'adapta en uns segons a la seva morfologia per passar per tots ells. El codi per definir les corbes NURBS és molt complex i no entraré en ell però si que mostraré el codi d'adhesió que permet vincular els dos tipus de partícules ja que és prou comprensible. El procés es podria descriure esquemàticament de la següent manera, en un primer moment s'identifiquen les partícules a relacionar tant la virtual com la real.

3.2.6.4 *codi*

```

6327         int id = NURBCrv[i].Particles[i].id;
6328         float c = NURBCrv[i].Particles[i].u;
6329         BezierPointTangent Pnt = NURBCrv[i].GeneratePointTangent(c);
6330         dd = (float) Math.Sqrt(Pnt.dx1 * Pnt.dx1 + Pnt.dy1 * Pnt.dy1 + Pnt.dz1 * Pnt.dz1);
6331         if (dd > 0)
6332         {
6333             Pnt.dx1 /= dd;
6334             Pnt.dy1 /= dd;
6335             Pnt.dz1 /= dd;
6336         }
6337         xx = (float) (Pnt.x - Pts[id].x.Val);
6338         yy = (float) (Pnt.y - Pts[id].y.Val);
6339         zz = (float) (Pnt.z - Pts[id].z.Val);
6340         dd = (float) (Math.Sqrt(xx * xx + yy * yy + zz * zz));
6341         if (dd > 0)
6342         {
6343             xx /= dd;
6344             yy /= dd;
6345             zz /= dd;
6346             mm = (float) ((NURBCrv[i].Particles[i].mass + Pts[id].Mass.Val) * 10) / Fac;
6347             m1 = (float) (Pts[id].Mass.Val / mm);
6348             m2 = NURBCrv[i].Particles[i].mass / mm;
6349             NURBCrv[i].Particles[i].vu += (float) (Pnt.dx1 * xx + Pnt.dy1 * yy + Pnt.dz1 * zz) * (m1 / 10);
6350             if (Pts[id].Active.Val)
6351             {
6352                 Pts[id].ax += (xx * dd * 1 * m2);
6353                 Pts[id].ay += (yy * dd * 1 * m2);
6354                 Pts[id].az += (zz * dd * 1 * m2);
6355             }
6356         }

```

Fig 45. Codi de les fórmules que posen en relació les partícules reals i les virtuals sobre la corba NURBS

En primer lloc es recorre tot el llistat de partícules virtuals les quals guarden un valor enter intern que identifica a la partícula real amb la qual es relacionen. Amb aquest valor obtenim també la partícula real associada a les mateixes. En segon lloc s'obté la posició a l'espai i la tangent del punt virtual i a partir d'aquí es posen en relació els dos punts a partir de les seves coordenades. A la línia **6323** està posada la funció que recorre el llistat de punts virtuals. Més a baix a la línia **6327** veiem com obtenim un valor enter que identifica la partícula real amb la qual es relaciona anomenat "*id*". A la línia **6329** calculem la posició a l'espai i la tangent del punt virtual per poder-lo posar en relació i emmagatzemo el resultat a una variable nomenada "*Pnt*", això ho fem a través de la funció "*GeneratePointTangent*" que és interna a l'objecte *NURBCrv* que correspon a una classe de creació pròpia que ens retorna precisament aquestes dades. De les línies **6330** a la **6336** el que fem es transformar el vector obtingut anteriorment en unitari de manera que el pugui operar. A partir de la línia **6337** es realitza una operació d'atracció entre partícules molt similar a la que ja hem vist en descriure les forces de camp en partícules i que no descriure en més detall. Si que mostraré a tall d'exemple el codi que controla la cinètica de la partícula que es mou per la corba ja que té algunes peculiaritats.

```

6359:         for (int ii = 0; ii < NURBCrv[i].Particles.Length; ii++)
6360:         {
6361:             if (!NURBCrv[i].Particles[ii].Kill)
6362:             {
6363:                 NURBCrv[i].Particles[ii].u += NURBCrv[i].Particles[ii].vu;
6364:                 NURBCrv[i].Particles[ii].vu -= NURBCrv[i].Particles[ii].vu / 2;
6365:                 if (NURBCrv[i].Particles[ii].u > 1) { NURBCrv[i].Particles[ii].u = 1; }
6366:                 if (NURBCrv[i].Particles[ii].u < 0) { NURBCrv[i].Particles[ii].u = 0; }
6367:             }
6368:         }

```

Fig 46. Aplicació de la velocitat sobre la partícula virtual que es mou per l'espai de la NURBS

Com veiem el codi és extremadament curt i és estrictament unidimensional. Fixem-nos que la posició es descriu com a "*U*", la velocitat es descriu com a "*VU*" i la partícula s'identifica com a "*NURBCrv[i].Particles[ii]*" de la qual extraïem les dos propietats anteriors. A la línia 6363 únicament es suma la velocitat a l'acceleració, i a la línia següent es redueix el valor de velocitat a la meitat simulant una fricció. fins aquí és normal però a la línia 6365 i 6366 veiem que cal limitar el valor màxim de posició i velocitat perquè la corba té uns límits. En realitat no tenim perquè limitar-ho ja que una NURBS és infinita però normalment el que fem és agafar retalls d'aquest espai per definir un objecte de la mateixa manera que fem amb la recta o el pla. Així si el valor és inferior a 0 o major que 1 es corregeix.

3.2.7 Superfícies NURBS

Els sistemes de malla, similarment al que ja hem vist en el cas de les polilínies, aproximen la forma d'una superfície a partir de conjunts de triangles plans. A causa d'això no deixen de ser aproximacions planes d'elements que en realitat tenen curvatura en tots els seus punts de manera que si volem una definició més precisa hem d'augmentar molt la densitat de la malla, i malgrat tot encara serà inexacte. En general, doncs, les malles pateixen dels mateixos problemes que ja hem esmentat per les polilínies i per tant necessitaven d'una solució similar a la que hem observat per les corbes que permetés recuperar tota una varietat de geometries que quedaven excloses amb sistemes tradicionals. En extrapolar les corbes NURBS al cas de les superfícies van aparèixer un nou tipus d'elements que es defineixen a partir del mateix principi que les corbes NURBS i que no són més que la translació a un espai bidimensional d'aquestes. Actualment aquestes superfícies constitueixen un dels mètodes més potents que hi han per controlar superfícies corbes amb sistemes de computació. Aquestes han permès modelar amb precisió elements que fins ara només es podien aproximar a partir de malles formades per elements plans o per dibuixos fets a mà amb totes les incoherències que comporten. Gràcies a això tota una nova varietat d'elements de tipus orgànic han pogut passar a formar part habitual

dels models 3D en sistemes CAD amb total precisió cosa que ha permès trencar l'estricta linealitat que fins ara dominava els models arquitectònics. Però el control d'aquests elements és més difícil i menys directe del que altres objectes més simples com la malla, a més constructivament parlant les formes orgàniques, tot i poder-se modelar, són molt difícils de construir a causa de que acostumen a requerir elements de doble curvatura. Aquests dos problemes són els pitjors defectes que té aquest sistema ja que la geometria no és directament construïble i la modificació d'aquesta no és intuïtiva de cara a l'usuari.

3.2.7.1 Descripció

Si generem un espai en el qual els eixos estiguin definits per dues corbes NURBS, els punts situats sobre aquest espai bidimensional tindran dues coordenades que caldrà situar seguint els dos eixos que componen el sistema. Gràcies al procés de càlcul que fa servir aquest sistema, quan obtenim la posició d'un punt també obtenim la tangent en aquell punt de manera que en el cas de les superfícies obtenim dues tangents que es corresponen amb les dues corbes que defineixen els eixos de la superfície en aquell punt. Aquesta propietat és essencial de cara a generar forces que permetin als diferents elements relacionar-se amb les superfícies NURBS. Fent servir les tangents també puc obtenir la normal de la superfície en cada punt de la mateixa, de tal manera que el sistema ens retorna les dades essencial per poder treballar geomètricament sobre aquest element.

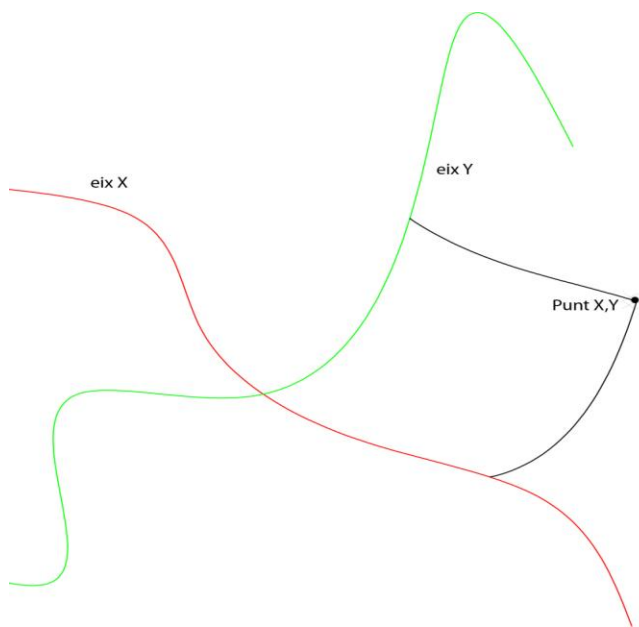


Fig 47. Exemple de superfície definida per dos eixos que es corresponen amb dues corbes NURBS. com veiem per trobar un punt cal donar una dimensió en cadascun dels eixos i seguint ambdues curvatures trobem el punt indicat.

3.2.7.2 Forces basades en la NURBS

El repte de controlar aquesta mena de geometries des dels sistemes dinàmics no és senzill a causa del fet que no responen a una fórmula concreta per definir la posició dels seus punts, sinó que més aviat formulen un canvi de base d'un sistema intern de coordenades bidimensionals (u, v) a un sistema universal de coordenades tridimensionals (x, y, z). Les coordenades internes u i v no tenen res a veure amb les coordenades externes x, y i z de manera que la relació entre els elements x, y i z i els elements U i V d'una superfície NURBS de vegades es fa una mica difícil. Però per altra banda, el sistema és relativament eficient, permet fer tota mena de curvatures, i tot i que no és perfectament precís, permet calcular interseccions i altres operacions a partir de sistemes d'aproximació i iteració que donen uns marges d'error molt reduïts.

De cara a fer servir activament els sistemes NURBS dins els sistemes dinàmics hem plantejat utilitzar-los com un element estàtic al qual adherir elements dinàmics. Generar una força d'adhesió a la superfície no ha estat una tasca fàcil perquè ha calgut plantejar una estratègia relativament eficient a partir de la qual es pugui crear una força d'atracció entre una superfície i una partícula a l'espai. Com ja hem dit anteriorment qualsevol intent de relació entre un objecte tridimensional i una superfície NURBS passa necessàriament per un procés de càlcul iteratiu perquè no disposem de fórmules que ens permetin trobar interseccions o punts propers directament. Com que la superfície NURBS té unes coordenades internes u, v per definir els seus punts, i en el fons és com un espai bidimensional alternatiu capaç de traduir les seves coordenades a un món tridimensional, hem plantejat el mateix sistema que ja feiem servir per les corbes NURBS però ara aplicat a superfícies. En Traduir les coordenades u i v d'un l'element virtual que viatja per la superfície de la NURBS a l'espai tridimensional, aquest es pot posar en relació amb elements de l'espai tridimensional fent que rebi accions d'elements externs que poden ser traduïdes a impulsos en les direccions u i v .

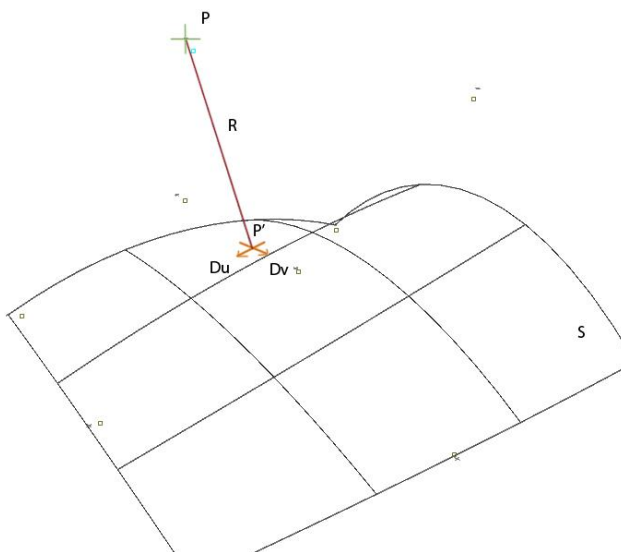


Fig 48. Esquema de funcionament del camp de força que manté unida una partícula a una superfície NURBS.

Extreure una posició tridimensional a partir de les coordenades u i v d'una superfície NURBS és una operació relativament treballada i eficient que a més ens proporciona dues direccions de tangents a la superfície seguint la projecció dels vectors u i v en aquell punt de manera que puc extreure la posició la partícula virtual i transformar les accions que rebí a accions en la direcció dels vectors u i v . Així amb una simple operació puc obtenir les dades necessàries per posar en relació dues partícules en espais diferents i fer que es moguin en relació l'una amb l'altre encara que estiguin en espais diferents.

La força que estableixo tendeix a ajuntar aquestes dues partícules de manera que si bé la partícula virtual només es podrà moure en la superfície NURBS, ho farà sempre aproximant-se el més possible a la partícula real, aquesta última podrà moure's lliurement i tendirà aproximar-se el més possible a la partícula virtual. Fent això el comportament general dels dos elements serà convergir a un punt i restringir els moviments de la partícula real a l'espai determinat per la superfície NURBS, però amb la possibilitat de separar-se'n si apareix una acció externa prou significativa. Per controlar aquesta interacció cal regular la intensitat de l'atracció entre la partícula real i la partícula virtual que es mou sobre el pla u, v com ja hem fet en la major part de casos anteriors d'aquesta manera podrem donar més o menys prioritat a aquesta condició. Una altra propietat que hem hagut de controlar és el marge que poden deixar les dues partícules entre elles de cara a permetre que la partícula real es separi de la superfície lliurement dins marge establert per l'usuari ja que una adhesió total a la superfície de vegades comporta restriccions massa fortes. Aquest factor fa que es pugui donar un marge d'error en el qual una estructura es pugui adaptar sense passar exactament per tots els punts de la superfície corba tot i seguir-la en termes generals.

3.2.7.3 *Generació*

La generació de superfícies NURBS requereix d'una quadricula ordenada de nodes a partir de la qual poder construir els punts de control de la NURBS. Això vol dir que no podem generar lliurement aquesta mena d'objectes com si haviem fet en canvi en el cas de les corbes o de les polilínies. Per això en general la creació d'aquesta superfície implica la generació d'un seguit de partícules que facin de punts de control. Per crear-los es segueix el mateix procediment que a les malles, en el qual l'usuari situa els 4 punts extrems i la resta s'interpolen.

3.2.7.4 *codi*

De cara a la vinculació dinàmica de les partícules amb la superfície el mecanisme és molt similar al que ja hem vist per a les corbes NURBS, però a diferència del cas anterior en el qual només hi havia una dimensió U per delimitar la posició a la corba NURBS ara hi ha dues posicions U i V per delimitar la posició de la partícula a la superfície. Això implica que cal calcular dues components de l'acceleració a partir de les dues rectes tangents per al punt donat. En general l'única variació respecte al cas anterior és, doncs, que es dupliquen les funcions.

```

7240
7241 if (Pts[id].Active.Val)
7242 {
7243
7244     xx = (float)(Pnt.x - Pts[id].x.Val);
7245     yy = (float)(Pnt.y - Pts[id].y.Val);
7246     zz = (float)(Pnt.z - Pts[id].z.Val);
7247     dd = (float)(Math.Sqrt(xx * xx + yy * yy + zz * zz));
7248     Pts[id].DevUV.Val = dd;
7249     if (dd - (float)NURBSrf[i].Dist.Val > 0)
7250     {
7251         xx /= dd;
7252         yy /= dd;
7253         zz /= dd;
7254         dd -= (float)NURBSrf[i].Dist.Val;
7255         mm = (float)(NURBSrf[i].Particles[ii].mass + Pts[id].Mass.Val);
7256         m1 = (float)(Pts[id].Mass.Val / mm);
7257         m2 = NURBSrf[i].Particles[ii].mass / mm;
7258         float p1 = 1;
7259         float p2 = 1;
7260         float p3 = 1;
7261         if (Pts[id].u == 0 | Pts[id].u == 1) { p1 = 0; p2 = 1; p3 = 5; }
7262         if (Pts[id].v == 0 | Pts[id].v == 1) { p1 = 1; p2 = 0; p3 = 5; }
7263         NURBSrf[i].Particles[ii].vu += (float)(Pnt.dx1 * xx + Pnt.dy1 * yy + Pnt.dz1 * zz) * (m1 / 100) * p1;
7264         NURBSrf[i].Particles[ii].vv += (float)(Pnt.dx2 * xx + Pnt.dy2 * yy + Pnt.dz2 * zz) * (m1 / 100) * p2;
7265         Pts[id].x.Val += (xx * Fac * 0.1f * dd * p3);
7266         Pts[id].y.Val += (yy * Fac * 0.1f * dd * p3);
7267         Pts[id].z.Val += (zz * Fac * 0.1f * dd * p3);
7268         Pts[id].ax += (float)(xx * dd * 0.1f * Fac * m2 * p3);
7269         Pts[id].ay += (float)(yy * dd * 0.1f * Fac * m2 * p3);
7270         Pts[id].az += (float)(zz * dd * 0.1f * Fac * m2 * p3);
7271     }

```

Fig 49. Codi de les fórmules que mantenen unides les partícules reals i les virtuals en una superfície NURBS

A les línies **7244**, **7245**, **7246** i **7247** es calcula el vector que uneix la partícula virtual sobre la NURBS "Pnt" amb la partícula real "Pts[id]" i la distància entre les dues. A la línia **7249** es posa com a condició que la distància entre la partícula real i la virtual sigui menor al marge que li donem a la superfície. A les línies **7251**, **7252** i **7253** es divideixen les components per la distància obtenint el vector director que uneix les dues partícules. Acte seguit a la distància se li resta el marge, i es calcula la proporció de masses entre les dues partícules. Fins aquí el càlcul és senzill i l'única anomalia que trobarem és que quan la posició de la partícula virtual sigui U = 1 o U = 0 o bé V = 1 o V = 0, deixarem de sumar valors a la velocitat i augmentarem el valor d'atracció de la partícula real cap a la virtual. Això es fa perquè tot i que les partícules virtuals tenen un límit per a la seva posició la seva velocitat pot seguir augmentant encara que no es moguin cosa que dona problemes en certes situacions. Aquesta operació es pot observar de la línia **7258** a la línia **7262**. Finalment a les línies **7263** i **7264** es pot veure com es sumen els

valors corresponents a les partícules virtuals i de la línia **7265** a la **7270** com es sumen aquests valors a la partícula real, tant a la seva posició com a la seva acceleració.

3.3 Eines i procediments bàsics de control dinàmic

Un dels canvis més significatius respecte altres eines de modelatge tradicionals és que el programa participa activament en la generació de solucions geomètriques i això vol dir que el paper de l'usuari com a dibuixant perd pes respecte al paper de director que dirigeix i controla processos. Aquest fet implica un canvi de mentalitat respecte a l'ús que es feia dels sistemes informàtics en arquitectura, ja que passem de fer servir l'ordinador com una eina de treball lineal a fer-lo servir com un instrument d'acció intel·lectual que és capaç de generar informació de tot tipus per si mateix seguint les nostres directrius. Aquest fenomen també està tenint lloc en sistemes de modelatge molt avançat que estan en estret contacte amb la programació i que estan demostrant una gran capacitat que encara no hem estat completament capaços d'administrar correctament. Cal partir de la idea de que les eines digitals són capaces de multiplicar el nostre pensament i desenvolupar-lo a gran escala, tal com fa una palanca mecànica amb la força física, per comprendre el que està passant en el món digital de manera molt més adequada. Com a exemple observem les ciutats generades de manera programada per adonar-nos del que implica aquesta idea, en aquests casos un programa seguint unes directrius concretes és capaç de generar teixits urbans gegantins en qüestió de minuts¹⁶⁴. Veurem també que en cap cas aquests sistemes estan substituint a la persona sinó que estan multiplicant les seves capacitats i reduint la quantitat de gent que cal per realitzar una tasca, això, més que a una pèrdua de llocs de treball, està fent que les tasques es modifiquin per adaptar-se a una major capacitat de tractament de la informació. En reestructurar el sistema de producció es poden mantenir els membres de l'equip però augmentar el rendiment de forma significativa. Així, doncs, es pot dir que les noves eines estan modificant l'ofici en oferir noves capacitats que abans no existien, i la nova capacitat que tenim a mà és la capacitat de processar informació de manera automàtica.

En aquest context els sistemes dinàmics són un mètode d'aprofitar aquesta capacitat de processament en favor de l'usuari per generar informació útil. En aquest sentit apareixen tota una paleta nova d'eines que permeten regular de manera eficaç els processos o "camps de força" quan actuen en el model dirigir-los en un sentit o un altre. La finalitat serà aconseguir que el sistema de forces modifiqui el model de manera adequada a les nostres necessitats, i per això hem de ser capaços d'aprofitar la capacitat dels sistemes dinàmics per controlar grans quantitats

¹⁶⁴ <http://www.esri.com/software/cityengine>

d'elements de manera simultània a partir d'unes normes fixades. En aquest sentit cal donar moltes facilitats perquè l'usuari pugui accedir a aquestes eines ja que el temps juga un factor important en aquesta mena de modelatge. De vegades el model que ens interessa pot tenir lloc en un període de pocs segons en els quals si no el fixem o d'alguna manera retenim el resultat el perdrem. Val a dir també que la generació d'eines que permetin controlar els camps de força de cara a modelar amb elles és completament experimental i encara està molt influenciada pels sistemes de modelatge tradicionals. Possiblement cal un major desenvolupament d'aquestes que podria donar lloc a idees molt interessants que ara mateix no és possible desenvolupar més, però en qualsevol cas, les eines que hem desenvolupat han estat provades reiteradament de cara a fer modelatges molt bàsics sense perdre'n el control. Totes les forces que actuen en el programa han estat descrites quan parlàvem dels elements bàsics. En tant que forces pures tenim:

- Forces d'atracció o repulsió entre partícules
- Forces que mantenen dos partícules a una distància determinada com si fossin barres.
- Forces que mantenen un seguit de partícules sobre un mateix pla.
- Forces que mantenen un seguit de partícules sobre una mateixa recta (no confondre amb les barres).
- Forces que mantenen l'angle entre dues barres.
- Forces que mantenen una partícula adherida a una corba NURBS.
- Forces que mantenen una partícula adherida a una superfície NURBS.

No hem inclòs les equidistàncies perquè no poden ser considerades pròpiament forces sinó modificadors que actuen sobre altres forces igualant alguna propietat. En aquest sentit no exerceixen una acció directa sinó indirecta sobre el model. Cal dir també que la major part de propietats es basen en regular el comportament de la partícula ja que el sistema de simulació està basat precisament en partícules. És lògic, doncs, que aquestes retinguin la major part de propietats a partir de les quals modificarem el comportament general. Com que hi ha factors que cal controlar-los de manera molt eficient i ràpida per poder operar amb comoditat, hem desenvolupat una interfície gràfica basada en barres de control personalitzades en les quals podem afegir o treure les funcions i les propietats que necessitem manipular a l'hora de modificar el model. Aquest sistema és part de l'eina de modelatge i cal no desvincular-lo del treball de l'arquitecte ja que el que a primera vista pot semblar un element superflu relacionat amb la interfície gràfica del programa, en realitat pot obrir o tancar moltes portes a l'hora de fer propostes arquitectòniques. Hi ha, doncs, dues estratègies bàsiques per definir el comportament d'un camp de força que són a partir de paràmetres numèrics o a partir del control de la intensitat. Val a dir que els paràmetres numèrics acostumen a controlar aspectes molt concrets i poc

generalitzables del comportament d'un camp de força però que com veurem més endavant són essencials per donar una mínima versatilitat al programa. En canvi el control de la intensitat molts cops es pot generalitzar i acostuma a donar-se el cas que no ens interessi controlar una intensitat particular sinó un conjunt. En aquest sentit ens calen tant controladors generals com controladors específics per regular aquesta propietat i fins i tot ens pot interessar coordinar la variació de múltiples intensitats de camps diferents alhora, cas pel que hem desenvolupat una estratègia. Ha calgut, doncs, generar menús que permetin controlar tant els aspectes específics com els generals de les diferents accions de manera que puguem accedir a processos dinàmics molt elaborats amb els quals podem obtenir elements de cert interès formal.

Segons el camp de força en els quals estiguem actuant la variació de les propietats tindrà un efecte diferent sobre el resultat ja que cada força té un comportament propi que caldrà dominar abans d'aventurar-se a modificar-la. Els controls més específics permeten variar aspectes clau del seu comportament dinàmic i que no es poden entendre sense comprendre el funcionament intern del mecanisme. A continuació es repassarà cadascuna de les forces per analitzar el seu comportament i propietats particulars.

3.3.1 Control de la intensitat de camp

Tot camp de força actua dins un límits espacials establerts, amb una intensitat determinada i sobre una sèrie limitada d'objectes. En aquest sentit la intensitat és un dels tres factors bàsics a partir del qual controlar l'acció d'una força ja que regula la capacitat que té per modificar el model. Tal com hem vist en descriure el funcionament intern dels elements bàsics a quasi tots apareixia el factor "*Fac*" que regulava la intensitat del camp de força i que era directament assignat per l'usuari. Aquest factor és el que controla la intensitat del camp i és el que ens permet variar la proporció que donem a les intensitats que componen el model obtenint així una gran varietat de solucions amb una única configuració. En anar donant prioritat a un camp de força sobre els altres, el model modifica considerablement la seva morfologia, de fet en el cas dels sistemes de panel·lització és fonamental regular correctament aquests camps de força per obtenir un resultat adequat, ja que segons l'equilibri que establím entre les diferents forces donarem prioritat a un aspecte geomètric o a un altre. Per exemple podem donar prioritat a que els panells siguin perfectament plans o donar-li prioritat a que segueixi la forma inicial de manera molt fidedigna, segurament aquestes dues condicions són contradictòries entre elles de manera que es pot regular quina de les dues volem que prevalgui sobre l'altra variant la intensitat dels caps de força. Un altre aspecte fonamental del control de les intensitats és que de vegades hem de variar els valors de diferents intensitats alhora per obtenir l'efecte desitjat, doncs, si les modifiquem una per una no obtenim la transformació adequada. En aquest sentit hem hagut d'afegir la possibilitat

(només a nivell global) de coordinar la intensitat de moltes forces perquè es modifiquin de manera coordinada. D'aquesta manera es poden plantejar diferents combinacions que donen lloc a transformacions molt variades. Val a dir que la suavitat amb la qual es produeixen les transformacions afecta sensiblement els resultats. Les transformacions que tenen lloc de manera brusca acostumen a donar resultats menys interessants que aquelles que s'han anat produint de manera paulatina ja que no s'han equilibrat igual les forces i per tant el resultat és menys adequat. En certa manera el control de la intensitat ens permet esculpir de manera indirecta el model amb el gran avantatge de que les nostres accions afectaran a tot el conjunt i no caldrà que ens preocupem de modificar cada punt en concret.

3.3.2 Fixació dels punts

Com el procés de transformació és continu de vegades la configuració que ens interessa dura només uns segons. Així, doncs, cal alguna manera de fixar el model en el moment en el qual hi ha una configuració que ens sembli interessant. Amb aquest objectiu hem generat una funció que desa el valor de posició dels punts de manera que el puguem recuperar més endavant. Cada Partícula conserva dos valors de posició, la inicial i l'actual. En fixar els punts el que fem és que la posició inicial s'actualitzi. En desactivar el comportament dinàmic el punt torna a la posició inicial i per tant a la última configuració guardada. D'aquesta manera cada cop que fixem els punts desmolem la seva posició a l'estat inicial. Això no sempre és pràctic ja que de vegades ens interessaria més poder desar múltiples posicions d'un mateix model. Tot i que hem detectat el problema no hem pogut encara plantejar-hi una solució.

3.3.3 Afegir/eliminar elements d'un camp de força

En el procés de generació dels camps de força s'acostuma a demanar sobre quins elements volem que actuï el camp. És habitual que més endavant ens interessi canviar aquest llistat per afegir-hi o treure-hi elements de manera que necessitem plantejar sistemes que ens permetin canviar els elements afectats pel camp de força amb agilitat. De moment el programa consta d'unes opcions bàsiques que ens permeten indicar quin camp de força volem modificar i quins elements hi volem afegir, tal com si fossin funcions. Però aquest mètode no permet eliminar elements d'un camp de força i no ofereix un control intuïtiu de les relacions dins el model. De la mateixa manera que en el cas anterior el sistema està plantejat de manera esquemàtica i necessita desenvolupar-se. Però ja hem plantejat una possible solució a aquest problema a partir del sistema de Grafs que hem exposat anteriorment i que es poden aplicar amb molta facilitat

sobre aquesta mena de casos permetent un control directe de les relacions entre els elements i donant una visió global clara de l'esquema general de relacions entre ells cosa que permet entendre el funcionament amb molta facilitat.

3.3.4 Control de partícules

3.3.4.1 Control de les forces d'atracció i repulsió entre les partícules

En comprovar les propietats de les partícules hem vist que aquestes podien exercir atraccions i repulsions entre elles a partir d'una sèrie de camps de força basats en les accions a distància que observem a la natura. Per generar aquests camps ens cal accedir a les propietats internes de la partícula, donar els valors adequats i al mateix temps indicar un llistat d'elements (altres partícules) sobre les quals s'aplicarà el camp. Fent servir la funció anteriorment descrita podem posar en relació conjunts de partícules perquè es relacionin totes alhora i donin lloc a comportaments de grup molt esquemàtics però similar al cas que hem vist a "emflock". Un cop determinat un conjunt de partícules que es relacionaran entre elles cal definir les propietats del camp i aquí hem de donar valors concrets a les variables que controlen la força:

El **radi mínim** és un radi que determina quina és la distància mínima que pot haver-hi entre dues partícules a partir de la qual es repel·liran com si fossin dues esferes que xoquen. Amb aquesta propietat es poden regular aspectes geomètrics del model impedit situacions que en general no són gens desitjables com per exemple que les partícules es sobreposin entre elles com si no tinguessin volum i acabin totes sobreposades en un mateix punt. En general, quan establim forces d'atracció cal afegir sempre un límit mínim ja que sinó es produeix l'equivalent a un "forat negre" en el qual tots els elements tenen tendència a unificar-se en un únic punt.

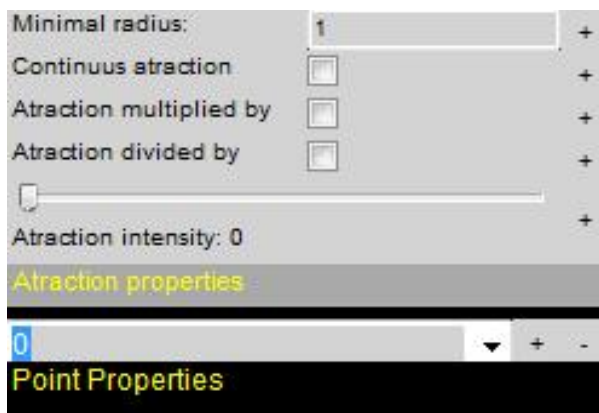


Fig 50. Panell de propietats que controla l'atracció entre partícules

La **intensitat**., com ja hem vist en apartats anteriors, és una propietat essencial de cara a mantenir una força sota control. En aquest sentit hem afegit una intensitat regulable a partir de la qual moderar o intensificar l'acció d'aquesta. Aquesta funció és important a l'hora de regular la intensitat que volem que tingui aquesta acció sobre les altres forces que estan actuant en el model ja que no sempre treballarem amb les mateixes intensitats generals. Equilibrar, doncs, l'acció és fonamental de cara a obtenir un control adequat del procés.

El **tipus d'atracció** també és un factor important de cara a establir com afectarà la distància a la força d'atracció entre els elements. Tal com hem descrit en repassar les fórmules internes hi ha tres variants en les fórmules que defineixen la força d'atracció, ja sigui que multipliquin, divideixin o romanguin constants respecte aquesta. En general per controlar grups de partícules lliures el més indicat és fer servir una funció equivalent a la gravetat, o sigui que divideixi la força per la distància de manera que l'acumulació es produeixi lentament. En el cas de malles però és més indicat el cas contrari, o sigui multiplicar la força per la distància, de manera que tots els elements quedin dins un àmbit delimitat i no en marxin.

En establir aquestes tres propietats el camp de força començarà a actuar sobre els elements determinats i veurem com les partícules s'atrauen entre elles i com van formant els primers conjunts. En el cas de partícules lliures podrem veure com es formen acumulacions d'elements que s'organitzen entre ells de diferents maneres segons el radi, la intensitat i el comportament del camp.

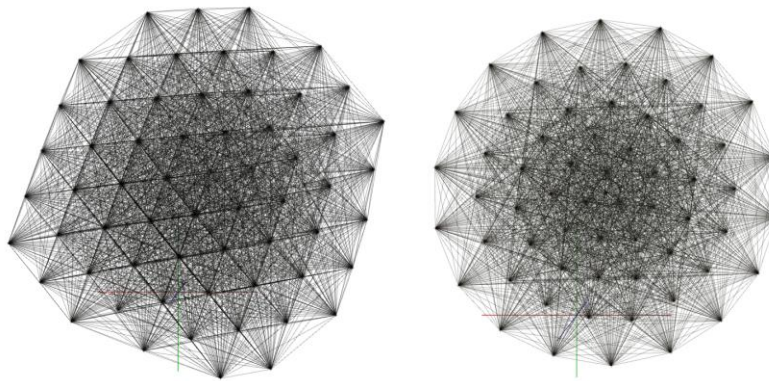


Fig 51. Conjunt de partícules atretes per un camp de força que queda representat per les línies que veiem entre elles. En el cas de l'esquerra la interacció és molt menys intensa que en el cas de dreta de manera que forma una estructura més regular de triangles, mentre en el cas de la dreta forma un cercle a causa de la major pressió.

3.3.4.2 Control de forces puntuals en partícules

L'addició de forces puntuals és una de les tècniques més bàsiques que hi han per produir deformacions concretes en una estructura. En el nostre cas hem donat la possibilitat de generar

una força sobre una partícula a partir de tres components amb els quals es calcula una força puntual. Aquesta força actua de manera contínua sobre la partícula com ho faria la gravetat o el vent. L'addició d'aquesta propietat permet generar arcs i voltes de catenària d'una manera relativament senzilla i molt intuïtiva. Per altra banda aquesta opció també permet aplicar-se com si es tractés d'una força de vent de manera que podem reproduir la pressió que s'exerceix sobre una partícula segons el sentit de la seva normal (que dependrà de l'orientació dels plans que tingui associats la partícula).



Fig 52. Panell de propietats de la partícula on es controla l'aplicació de forces del vent

El primer que cal controlar en aquest cas són les tres components que definiran la força. Aquestes tres components determinaran la direcció de l'acceleració. Certament és poc intuïtiu definir una direcció a partir de les components ja que normalment les direccions es determinen amb angles i la intensitat es dona apart, però en un primer moment i de cara a la comprovació general del funcionament m'interessa tenir un control directe de les components que estan actuant en la partícula. Un cop definida la força cal especificar el comportament de la força. Si no marquem cap opció aquesta actuarà de manera uniforme accelerant contínuament la partícula en la direcció de les forces sense tenir en compte cap altre aspecte. Si apliquem l'opció de vent "Wind" llavors es computaran les normals en el càlcul de la força i es tindrà en compte el fenomen de succió, com veurem més endavant la morfologia canviarà considerablement respecte al primer cas donant lloc a formes més aerodinàmiques més que no pas funiculars.

Apareixen també dues opcions més que són experimentals. En el cas del "wind inverse" hem comprovat si és possible aplicar el vent de manera inversa per tal de generar una estructura que resisteixi el vent a compressió. Aplico aquí el mateix principi que en els arcs funiculars però ja hem pogut constatar que els resultats no sempre són equivalents. També hem experimentat amb l'opció "four winds" en la qual aplico quatre direccions de vent perpendiculars entre si per tal de comprovar com es comportaria l'estructura si actuessin diferents accions de vent alhora. Cal tenir en compte que el model emergeix com a resultat de les accions quan apliquem només una direcció de vent el resultat només serveix per aquella direcció de manera que ens interessa comprovar com seria un model que tingues en compte tots les direccions alhora.

3.3.4.3 Control de propietats generals en partícules

Les propietats que hem vist fins ara afecten a un comportament concret i per tant són propietats particulars. Però hi ha aspectes més generals que afecten al comportament dinàmic de manera global i que cal tenir en compte a l'hora de controlar les propietats de les partícules. En aquest àmbit trobem la massa que afecta directament al comportament dinàmic ja que permet regular la inèrcia de cada partícula a l'acció dels camps de força externs a ella. En general aquesta propietat permet regular quin percentatge de l'acció s'emporta cada partícula involucrada en una interacció. Com ja passa a la natura com més gran és la massa d'una partícula respecte a una altra, més petita és la proporció d'acceleració que rep. Si per exemple una partícula que té molta massa xoca amb una altra que en té molt poca, la que té molta massa patirà una acceleració molt menor que la que en té menys. Aquest fenomen permet donar prioritat a certs aspectes geomètrics del model enfront d'altres ja que pot fer que una sèrie de partícules actuïn de manera independent a les altres. Fixem-nos en el següent aspecte relacionat amb el control de vores.

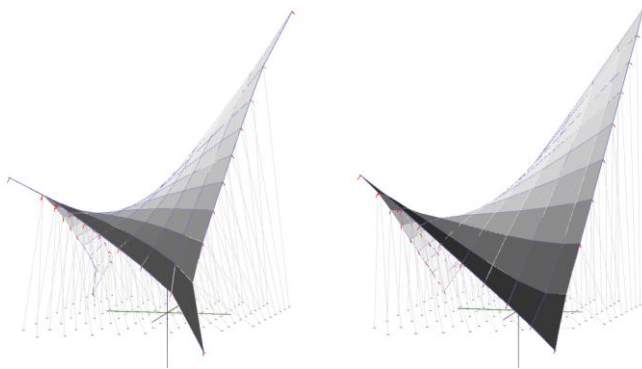


Fig 53. Aquestes dues figures tenen les vores controlades per una funció vectorial. Però en la primera veiem que la força vectorial no pot impedir que la tensió interna deformi les vores. A la segona s'ha augmentat la massa dels nodes del contorn 100 vegades, de manera que les accions internes tenen un efecte imperceptible.

Aquesta propietat no és específica d'un camp de força sinó que és general i afecta a la major part d'interaccions que es produeixen en el programa per això pot tenir molta utilitat.

De cara al control general del moviment de la partícula trobem l'opció de restricció del moviment que és un factor que determina en quines dimensions es podrà moure la partícula. El fet de bloquejar alguna de les tres dimensions del moviment fa que les partícules es comencin a moure en un pla o fins i tot en una recta. Això fa variar l'estat d'equilibri de manera que les deformacions varien considerablement ja que en tenir el moviment restringit en alguna direcció l'estat natural d'equilibri de les forces es veu alterat. Si per exemple restringim el moviment en les dimensions X i Y (pla horitzontal), i deixem llibertat per desplaçar-se només en la direcció Z (vertical) veurem que obtindrem elements similars als arcs i les voltes ja que mantindran una lògica d'equilibri basada en desplaçaments en la direcció vertical. Curiosament amb aquest mètode s'obtenen espontàniament formes molt similars a dissenys constructius relativament coneguts ja que sembla que fins ara la lògica estructural era únicament vertical. En canvi si deixem una completa

llibertat de moviments en totes les dimensions obtindrem formes similars a elements tèxtils de superfície mínima que són elements constructius molt més moderns i fruit de sistemes de càlcul molt més avançats.

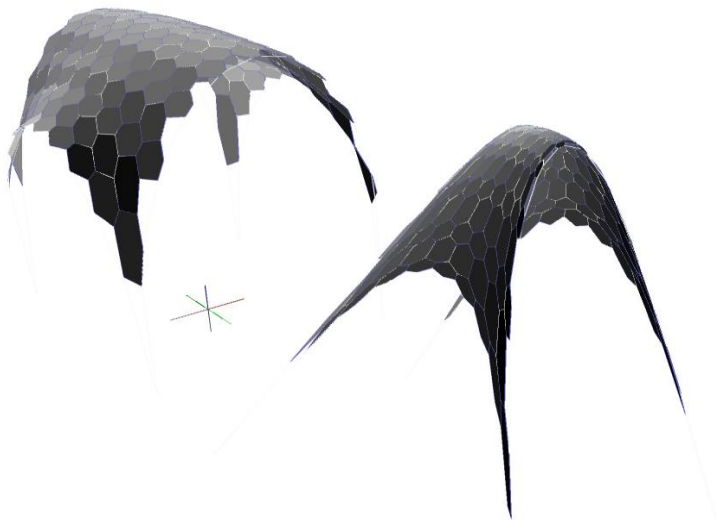


Fig 54. A la figura de la dreta s'ha permès una total llibertat de moviments mentre que a la figura de l'esquerra només s'han permès les deformacions en el sentit vertical. Com veiem els resultats varien notablement. La figura de la dreta té una disposició molt més propera a una estructura tènsil. La de l'esquerra si la miréssim en planta veuríem que ha mantingut perfectament el contorn dels hexàgons ja que no ha permès els desplaçament que no siguin verticals.

3.3.5 Control de les barres

El sistema de modelatge que fem servir en el programa es basa en generar estructures de barres o “*mass-spring models*”. Aquest sistema permet integrar i aplicar fàcilment les funcions dinàmiques en el model però requereix que a més de generar partícules es generin també una sèrie de barres que formin una estructura. Aquestes barres en realitat són camps de força que com ja hem explicat prèviament mantenen els punts a distàncies fixades entre ells. Aquesta força pot comportar-se de maneres molt variades i tant pot simular un element rígid com un element elàstic de manera que necessitem poder-li especificar aquestes característiques en el quadre de propietats. Per regular aquesta funció hem establert dos factors que ens permeten englobar una gran varietat de comportaments amb poques variables. La primera opció ens ofereix la possibilitat de que la barra sigui **rígida o flexible** cosa que es tradueix en que aquesta sigui capaç de modificar la seva longitud base o no. Aquesta propietat és fonamental en molts casos en els quals cal que les cordes s'adaptin a les condicions del model com per exemple quan treballem amb estructures tènsils i volem que les superfícies siguin sempre mínimes. Això ens obliga a que les longituds de les cordes variïn de manera contínua segons un valor de tensió interna. Si posem cordes rígides en aquest cas ens trobaríem que quan canviem la forma d'una malla aquesta s'arrugarà per culpa de que no es pot adaptar a la nova configuració i en aquest cas necessitarem “*tensor*” de nou la malla.

De cara a poder simular aquest comportament no en tenim prou amb establir que les cordes siguin elàstiques perquè també ens cal poder donar un valor de **tensió interna** que estiri la malla i la mantingui en tensió. Aquesta és la segona opció que podem controlar des del quadre de propietats. El valor de tensió interna afecta a la longitud base reduint-la de manera com més gran és la intensitat d'aquesta contracció més ràpidament es contrau la corda. Aquesta contracció tendeix a fer que la longitud valgui zero, de manera que no té un límit inferior a l'arronsament de les barres. En combinar-se aquesta propietat amb la capacitat de canviar la longitud segons les accions obtenim un corda que sempre està en tensió i que si s'estira s'allarga però si es deixa sense tensió es contrau fins a estar tensa de nou, el més curiós és que al dependre la contracció de la longitud de la corda l'estructura té tendència a equilibrar les longituds de totes les cordes i les seves tensions fent que mai quedi una estructura que no treballi de manera uniforme repartint aquest treball homogèniament per tota l'estructura. Alhora que ens dóna aquesta propietat mecànica també és un mecanisme que reordena els models i n'equilibra les longituds de les rectes cosa que de vegades ens pot resultar molt útil quan treballem amb malles lliures. Aquest mecanisme a més porta involuntàriament a les superfícies mínimes per qualsevol combinació i a moltes altres propietats que tenen un cert interès tant formal com estructural. Regular la intensitat de la tensió interna és, doncs, una funció necessària si volem controlar les cordes, en aquest sentit cal comprendre'n el funcionament per fer servir de manera apropiada aquest sistema.

El control de la intensitat ens permet regular l'atracció que exerceix la barra sobre els seus extrems per mantenir la longitud assignada. Posant poca intensitat obtindríem un comportament similar al d'una corda elàstica, però a diferència del cas anterior sempre tornaria a una longitud determinada i per tant no es podria adaptar. Per altra banda és fonamental poder determinar la intensitat de la força de les barres ja que és la funció més abundant en els models dinàmics i per tant quasi sempre cal regular-la amb molta cura.

Basada en la barra també trobem una altra força que ens permet mantenir un seguit de punts alineats sobre una recta. Aquesta força originalment era un element més de la simulació anomenat "*força vectorial*" però finalment hem decidit fusionar-lo amb les barres perquè tenen una sèrie de punts en comú que donaven peu a ambigüitats i alhora això simplifica el funcionament del programa. Aquesta força atrau un llistat de punts cap a una recta de manera que tots ells quedi alineats. Amb aquesta funció puc mantenir les vores de les malles o de qualsevol element sobre una mateixa recta de manera que guanyo control de l'element. Per generar aquesta funció necessito associar una sèrie de partícules a la recta, llavors li dono una certa intensitat a la força d'atracció i ràpidament els punts s'alineen.

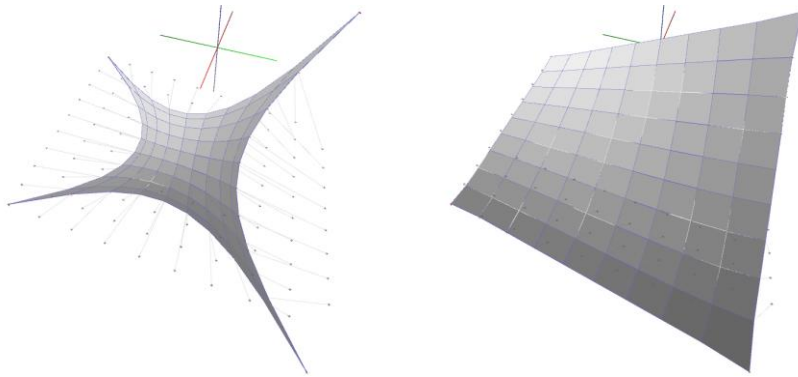


Fig 55. Exemple d'estructura de malla en la qual les vores estan controlades per una funció vectorial (dreta) i una altra que no disposa de funcions vectorials (esquerra).

3.3.6 Control de les forces del pla

El pla és un element molt versàtil que ha donat lloc a diverses estratègies de control relativament complexes però de gran interès. Les dades bàsiques que necessitem per definir un pla són un punt a l'espai i un vector que faci de normal. En l'aplicació dinàmica desenvolupada treballem amb superfícies de manera que a més de les dades per definir el pla ens calen uns punts de contorn que indiquin quins límits té la superfície dins el pla treballat. Aquestes són, doncs, les dades mínimes imprescindibles per definir un pla en el programa dinàmic. A partir d'aquí s'aplica la fórmula dinàmica descrita anteriorment en la qual el punt del pla i la normal es dedueixen dels punts de contorn que al seu torn es veuen atrets cap aquest pla en un procés iteratiu que acaba convergint cap a un element pla amb un contorn determinat. Com veiem tot i partir d'uns principis molt senzills la cosa és complica en el moment que comencem a combinar contorn lliures amb la condició de planicitat.

3.3.6.1 Llistat de propietats del pla

Aquesta funció, com podem veure, té moltes possibilitats de disseny que caldrà estudiar amb deteniment. A través del quadre de propietats haurem de controlar el seu comportament perquè actuï com nosaltres volem i un dels aspectes més bàsics que cal regular de cara a establir aquest domini és el control de la intensitat de la força que atrau els punts cap al pla de manera que puguem equilibrar la seva acció amb la dels de les altres forces que actuen en el model. Aquesta propietat es farà servir molt quan vulguem aconseguir conformar superfícies a partir d'elements perfectament plans ja que serà fonamental en aquests casos equilibrar correctament les forces. A més del control de les intensitats també apareixen moltes més possibilitats de control sobre la funció aquí definida que requereixen una descripció més detallada. Una de les més importants a nivell constructiu és definir el grau de planicitat que volem que els panells assoleixin descrita en el quadre de propietats com "*maximal deviation*". Aquest factor ens indica

una relació entre la desviació que mantenen els punts respecte al pla i l'àrea d'aquest. Com més gran és el pla, més gran és la desviació que admet de manera que la desviació sempre serà relativa a la superfície. Aquest factor ens assegura un grau de planicitat general que l'usuari pot controlar. Tot i que ara mateix és un factor relatiu és molt probable que tinguis un cert interès controlar la desviació absoluta, cosa que no requeriria de canvis substancials en la fórmula.

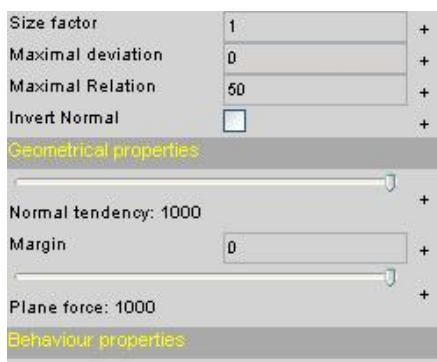


Fig 56. Panell de propietats del pla on podem observar els paràmetres principals de control.

3.3.6.2 Assignació de direccions a la normal

A partir d'aquest funcionament es poden generar diferents opcions de control. Una primera possibilitat va ser assignar valors a la normal de manera que nosaltres puguem determinar l'orientació del pla manualment i no dependre sempre del pla mig format pels elements de contorn. Per mitjà d'aquest sistema podem controlar cap a on miren els plans cosa que pot ser especialment útil si treballem amb elements que es comportin de manera independent entre ells com ara panells solars o lames. Per poder controlar aquest aspecte de manera intuïtiva hem generat l'opció d'associar una recta a un pla de manera que la normal d'aquest segueixi la direcció de la recta. Aquest sistema és molt més visual i intuïtiu que no pas modificar numèricament les tres components del vector de la normal. Un cop hem generat aquesta opció neix la necessitat de controlar la intensitat que regula quina prioritat té la recta assignada sobre el valor mig de la normal ja que pot ser que no vulguem forçar estrictament una direcció sinó que sigui únicament una tendència. Així com més alta és aquesta intensitat més preval el valor de la recta sobre la normal i per tant amb més violència s'estiraran els punts cap al pla definit per la recta, una intensitat baixa en canvi farà que la recta tingui poca prioritat sobre la normal mitja de manera que el moviment serà més suau.

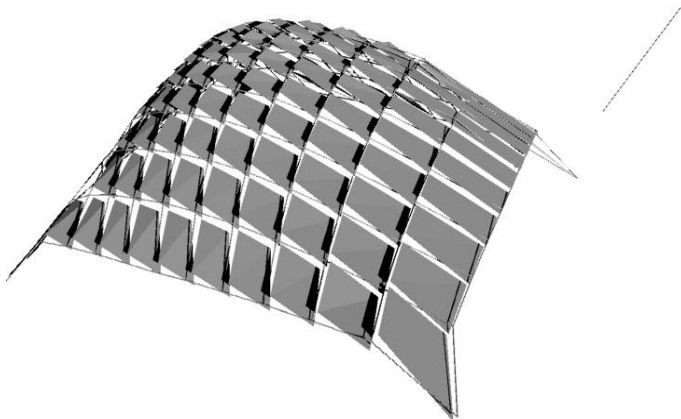


Fig 57. Exemple de malla on els panells orienten la seva normal respecte a una recta (que podem veure a la part superior dreta) com si fossin panells solars sobre una malla lliure.

Com veiem en la figura tots els panells s'han orientat seguint la recta indicada per l'usuari de manera que modificant aquesta podem modificar tots el model sense esforç i amb tota precisió. Un altre aspecte que cal observar és que els panells i el contorn de les cel·les de la malla no són la mateixa cosa. Això ens introdueix en el següent tema en el qual hem de treballar amb marges d'error. Finalment, abans de passar al pròxim tema, podem trobar l'opció d'invertir la direcció de la normal, cosa que de vegades és necessari fer per tal de tenir tots els plans orientats de manera que hi hagi una certa continuïtat en les normals dels plans que defineixen una superfície. Les demés opcions tenen a veure amb aspectes de representació.

3.3.6.3 Marges

Com que no sempre treballem amb plans independents entre ells i de fet la major part de cops hem de treballar amb malles en les quals els plans estan units pels seus extrems formant una superfície contínua ens vàrem veure en la necessitat de generar uns valors de marge que donessin un cert joc als plans a l'hora de situar-los sobre una superfície. Aquest valor ens permet que la representació d'un pla es mantingui plana encara que els seus punts es desviïn un cert valor (donat per l'usuari) respecte la seva superfície. Tot i que això pot semblar una mica confús els punts que defineixen el pla i el pla en si no són la mateixa cosa ja que de cara a fer panells constructivament viables ens interessa poder mantenir marges d'error. Gràcies a aquest marge podem treballar amb plans que mantenen desviacions respecte a l'estructura que els "sosté" tal com fan moltes estructures i per tant treballar amb toleràncies. El funcionament d'aquest mecanisme ha estat més complex perquè desvincular les vores del contorn real de la superfície per deixar-hi un marge obliga a doblar els punts necessaris per definir el pla i per altra banda afegeix un nou grau de complexitat a les fórmules. El desenvolupament d'aquest sistema de marges s'han anat plantejant diverses estratègies que han anat evolucionant fins a la solució definitiva. En un primer moment es van establir unes cordes als extrems del pla que el vinculaven

amb un contorn. Aquestes cordes feien de marge de manera que regulant la longitud de la corda podies regular el marge entre el panell i la vora real. Però més endavant aquest marge ha estat integrat dins el pla a partir d'uns punts interns "virtuals i dinàmics" independents dels punts "reals" del contorn de manera que no cal generar cordes ja que tot el procés queda com un element intern al pla. A partir d'aquesta estratègia si el marge és 0 llavors els punts reals i els punts virtuals estaran a la mateixa posició i per tant no tindrem marge d'error. Si el marge augmenta, la distància entre els punts virtuals i els punts reals també augmentarà (sempre i quan el sistema ho requereixi) de manera que els punts virtuals tindran més llibertat de moviments i podran definir un pla perfecte encara que els punts reals no estiguin perfectament alineats. Com veiem, aquest sistema permet establir tota mena de marges i veure quin efecte tenen en l'estructura, que en general correspon a que com més marge tenim menys tensions internes es generen. Aquest aspecte és molt pràctic de cara al plantejament de formes complexes a partir de panells perfectament plans ja que ens permet avaluar en quins marges ens hem de moure per crear una estructura a partir de peces perfectament planes.

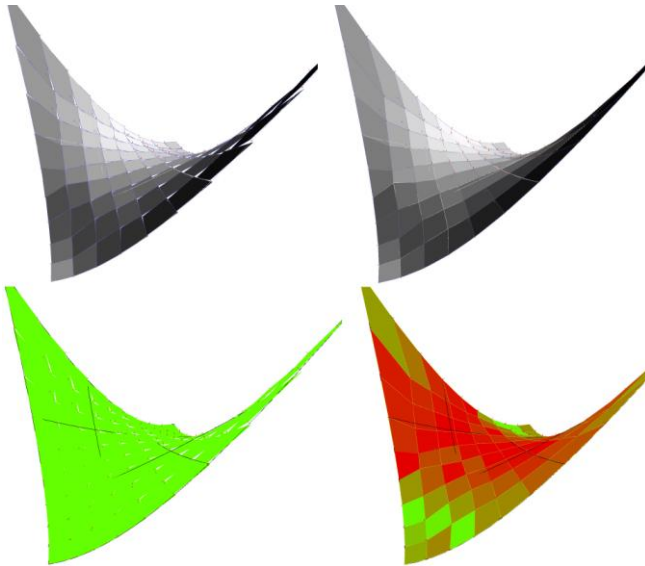


Fig 58. La següent figura mostra una forma alabejada, composta per panells perfectament plans. En el cas de l'esquerra hem permès un marge d'error molt ampli mentre que a la dreta hem restringit el marge d'error a 0. A la part inferior de cada figura veiem el mateix model amb un color segons el grau de planicitat de cada pla, corresponent-se el verd amb una planicitat quasi perfecta i els tons de vermell amb una major imperfecció. Com veiem quan no es dona cap marge d'error els plans no poden reproduir perfectament la figura i per poder-ho fer deixen de ser plans. Si donem marge d'error els plans conserven la seva planicitat.

3.3.7 Control de les forces angulars

Aquesta força es basa en posar en relació parells de rectes perquè formin angles determinats entre elles de manera que mantinguin una relació angular en qualsevol situació donada. El funcionament no és especialment complex i per tant no han donat lloc a quadres de propietats gaire extensos. En aquest sentit l'única opció que li hem afegit és el control de la intensitat ja que aquest és essencial de cara regular l'efecte de la força en el conjunt del model. Aquest mecanisme ens pot ser igualment útil en dues i en tres dimensions cosa que permet no només

aprofitar una única funció per totes dues casuístiques sinó també posar-les en relació. Per altra banda pot tenir aplicacions puntuals molt importants malgrat ser un mecanisme tant senzill, per exemple ens pot homogeneïtzar les peces d'una façana perquè es mantinguin dins d'unes morfologies determinades sense un excessiu esforç tal com veiem en la figura.

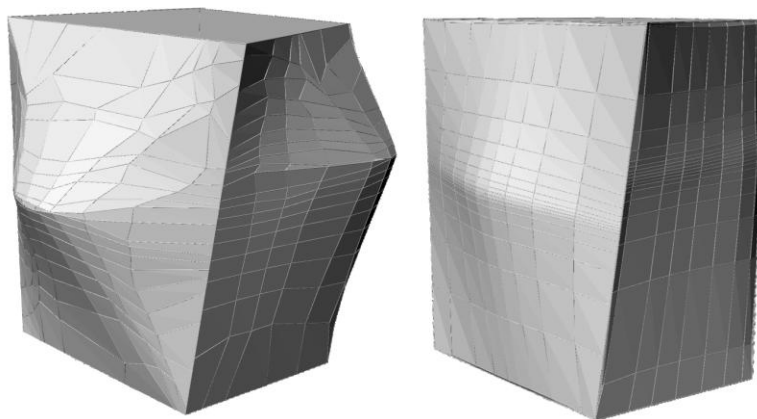


Fig 59. Exemple de dues façanes formades de panells plans els quals adapten el seu contorn per retenir la planicitat i alhora seguir la forma indicada per l'usuari. Mentre la façana de l'esquerra permet formes de panells arbitràries, la de la dreta restringeix els angles a 90° i els efectes són molt notoris.

Treballant en dues dimensions també podem aprofitar aquesta funció de cara a generar plantes en les quals els elements estiguin relacionats geomètricament entre ells i no únicament dibuixats. En realitat les aplicacions en dues dimensions poden ser molt útils a nivell pràctic ja que resolen problemes geomètrics habituals de l'ofici d'arquitecte amb molta facilitat.

3.3.8 Control de les forces d'atracció a NURBS

En aquest cas ens trobem sobre una força que com ja hem vist ha demostrat una certa complexitat en la seva formulació en la qual participen partícules reals i partícules virtuals. En sintonia amb el que ja passava en el cas del pla aquí necessitem una partícula que faci d'intermediària entre les partícules i les NURBS. Val a dir que a més d'aquest problema es planteja un conflicte geomètric de certa complexitat en intentar casar dos elements geomètrics que normalment no són compatibles com les malles de quadrats i les superfícies de doble curvatura, per això les tensions en aquesta interacció són molt fortes. Gran part d'aquests conflictes es solucionen en modificar les opcions del pla, que com ja hem vist permeten un control molt extens de les peces que componen una superfície. El que realment controlem a partir d'aquest mecanisme són les característiques generals de la unió entre una malla i una NURBS, i sobretot aspectes geomètrics de la NURBS.

Una de les opcions més importants en aquest sentit és el **marge** que ens permet indicar quina distància màxima podran deixar els punts assignats respecte la superfície NURBS a la qual s'adhereixen. Gràcies a aquest mecanisme es pot fer que la unió entre elements de geometries

molts diferents sigui menys forçada i que per tant les malles que intenten unir-se a una NURBS tinguin més flexibilitat a l'hora d'adherir-se. El problema que té aquest mecanisme és que com més gran és el marge menys relació guarden els elements adherits amb els elements de base, o dit d'una altra manera, les malles són menys fidels a la superfície NURBS a la qual estan adherides. En general és un joc d'equilibri en el qual trobar el punt just.

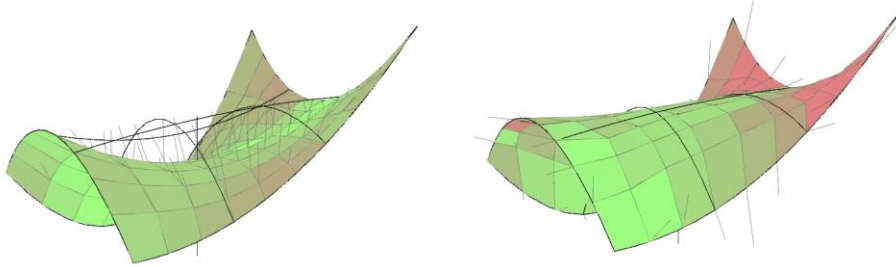


Fig 60. La següent figura podem observar com en el cas de l'esquerra s'ha deixat un ampli marge d'error i la malla es separa clarament de la NURBS i únicament encaixa les vores. el resultat és que la malla presenta molt poques tensions internes. En el cas de la dreta en canvi exigim un adherència sense cap marge de maniobra de manera que la malla es troba molt més forçada o per altra banda presenta moltes més tensions internes.

Un altre aspecte important és controlar el **grau** de la NURBS, aquest factor permet transformar la geometria de la superfície NURBS de base de manera que la seva curvatura sigui més o menys suau. Una curvatura molt pronunciada fa que la unió entre els elements sigui més complicada i en general pot donar lloc a problemes importants de coordinació entre totes dues geometries. Per altra banda una curvatura poc pronunciada és molt més fàcil de seguir per part d'una malla d'elements plans. És, doncs, important ser capaç de coordinar aquests factors perquè les geometries encaixin de la millor manera possible.

A més d'aquests factors cal afegir el control de la **intensitat** que ens permet adherir amb més o menys força les partícules a la superfície indicada. En general aquesta opció és similar a controlar el marge que deixem entre les partícules i la superfície, ja que en reduir la intensitat de la força d'atracció, les forces internes de la malla prevalen més sobre la força d'adhesió i per tant la malla no segueix amb tanta precisió la superfície. Però intentar regular el mecanisme d'aquesta manera té un desavantatge respecte a fer-ho des del marge i és que no controles el grau d'error sinó que l'aproximes, en canvi amb el marge el determines amb total precisió.

En aquest mecanisme cal tenir en compte que poden haver-hi casuístiques molt complexes en treballar amb la unió de geometries. Recordem que els sistemes dinàmics intenten equilibrar les forces de manera que hi hagi el mínim potencial possible. De vegades, amb geometries molt complicades el sistema té tendència a generar casos fortament degenerats en els quals es desvirtua fortament el disseny original. Per exemple, és un cas molt típic el que en una superfície

NURBS amb una corba molt pronunciada a la qual hem adherit una malla, els sistema obvií la corba posant-hi un gran panell al mig que només reproduïx el contorn i no la corba en si.

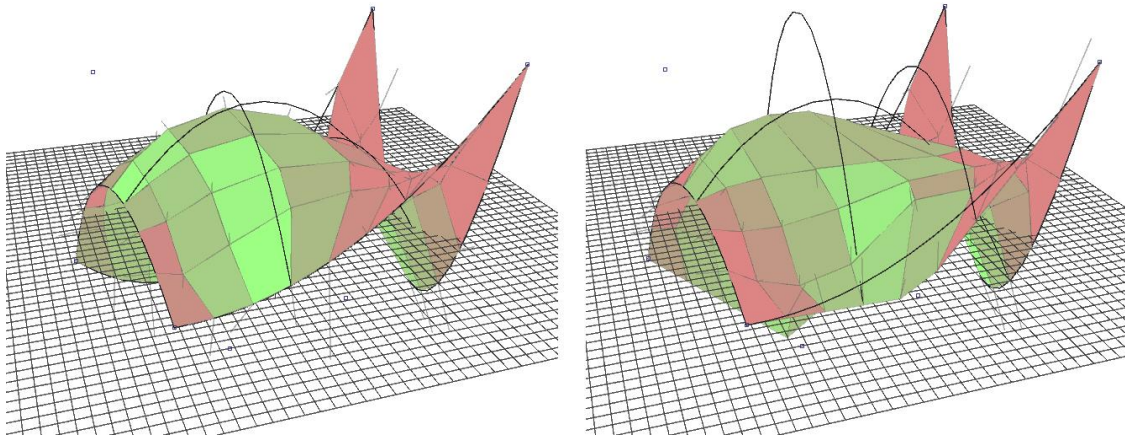


Fig 61. La següent figura podem veure com el contorn de la NURBS a la part central forma una important cavitat que en el cas de l'esquerra la NURBS és menys accentuada. En el cas de la dreta aquesta cavitat s'ha accentuat de manera que la malla no ha estat capaç de seguir la NURBS.

Aquest cas pot ser resolt si es bloqueja algun dels punts de la malla i se'l obliga a passar per la corba o si s'augmenta el grau de la superfície de manera que les curvatures siguin més suaus. Cal, doncs, disposar d'eines i estratègies que permetin resoldre situacions relativament difícils amb mecanismes senzills per tal de retenir tant la "constructivitat" com la virtut del disseny.

3.4 Descripció d'elements combinats

De cara a facilitar la tasca de modelatge amb objectes dinàmics s'han plantejat una sèrie d'estructures prèviament configurades que permeten construir ràpidament models amb característiques concretes sense que l'usuari hagi de definir-ho manualment. D'aquesta manera accedim a un gran ventall de possibilitats a partir d'estructures bàsiques que podem adaptar fent servir els mecanismes dinàmics a les situacions arquitectòniques que considerem adients. Aquestes estructures predeterminades generalment no tenen sentit en sistemes de modelatge estàtic perquè el sistema de control fa que la tasca de modificació de les peces sigui molt més costosa que fer-les de nou, però amb un sistema dinàmic aquests elements predeterminats es poden modificar còmodament fent que aquesta l'estratègia sigui viable.

3.4.1 Superfícies mallades

La malla és una de les estructures més bàsiques que podem trobar en el modelatge digital i es fa servir en quasi tots els programes de CAD. Generalment es crea a partir d'una quadricula de nodes que es combinen a partir de cordes i/o plans donant lloc així a una estructura bàsica extremadament versàtil. Tot i que la malla té una capacitat limitada per reproduir la curvatura en tots els seus punts, tal com hem vist en l'apartat d'introducció a les NURBS, també és igualment cert que és un objecte relativament senzill de programar i que té una correspondència directa amb els elements constructius. Prova d'això és el fet de que la malla pot ser fàcilment associada a façanes, murs cortina, cobertes, terrenys, aplacats, etc. En tots els casos l'objecte real es pot assimilar a una malla que simuli els aspectes geomètrics generals d'aquests elements. En el cas de les superfícies NURBS en canvi això no passa perquè es tracta d'elements molt més abstractes de manera que molts cops cal transformar de nou les superfícies NURBS en malles per poder-les fer constructivament viables a l'espera de que aparegui algun mètode constructiu prou econòmic com per reproduir elements de doble curvatura de manera eficient. A causa d'això la malla encara és un element fonamental de cara a treballar amb objectes dinàmics, ja que permet solucionar problemes constructius molt presents avui dia.

3.4.1.1 *Tipologies de malla*

Entre les tipologies de malla que podem fer servir en el programa hi ha dues classes bàsiques dividides pel tipus de cel·la que són les hexagonals i les quadrades. En realitat el programa admet qualsevol tipologia de cel·la que pugui ser dibuixada amb un programa de CAD, però sense establir una metodologia adequada per generar la malla de manera automàtica no és raonable deixar tota la tasca de definició geomètrica en mans de l'usuari i per tant no comentaré aquells tipus de malla pels quals no hagi desenvolupat un mètode automàtic de generació. Així, doncs, com que només hem creat eines per generar cel·les quadrades i hexagonals, tractarem només aquests dos casos.

Segons la configuració que escollim a l'hora de crear una malla podem dotar-la amb diferents comportaments dinàmics que permetin resoldre problemes concrets de disseny, per exemple amb aquest mecanisme es poden reproduir tota mena de superfícies tènils amb molta facilitat i total control de la geometria, a més també poden generar superfícies mínimes a partir de la modificació de les característiques del contorn. També es pot donar el cas de que decidim posar un panell a cadascuna de les cel·les, llavors una nova força entra en acció que és la del pla i que actua tal com hem descrit anteriorment racionalitzant la forma. Els resultats d'això poden ser molt

diversos però en general permeten traduir formes amb curvatures complexes a elements compostats per panells plans de manera molt natural i senzilla.

3.4.1.2 *Generació de malles*

Per generar una malla el programa demana quatre punts que representaran els quatre vèrtex d'un perímetre quadrat. A partir d'aquests quatre punts s'han de disposar automàticament partícules, cables i panells d'una manera determinada perquè donin lloc a una malla dinàmica. Per poder fer això es disposa una quadricula de partícules entre aquests quatre punts de manera que ens servirà de guia per generar les barres i els plans corresponents. Cal tenir en compte però que la tipologia de cel·la donarà lloc a diferents aproximacions al procés de generació de la malla, sent el cas més senzill el de panells quadrats ja que els panells es poden disposar directament a partir de la disposició en quadricula de punts, però quan la geometria dels panells canvia el problema es complica molt i cal començar a interpolar punts dins de la quadricula per poder generar els panells adequadament. En aquest sentit per generar malles hexagonals hem seguit una estratègia basada en partir d'una malla quadrada a la qual hem generat per cada vèrtex els punts necessaris per poder crear un panell hexagonal de manera que encaixi amb el següent. El resultat és un element extremadament flexible a nivell geomètric que permet adaptar-se fàcilment a situacions complexes traduint-les a una estructura relativament regular i parametritzable.

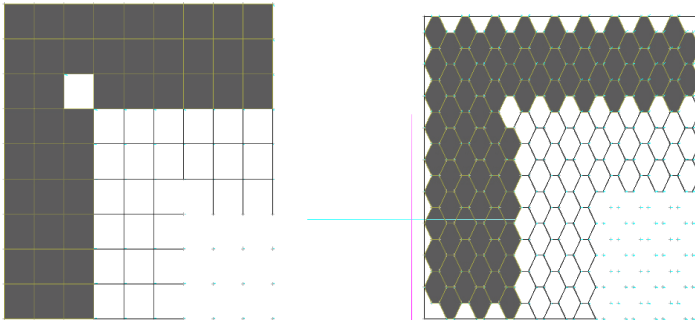


Fig 62. Dos esquemes de malla en les quals podem observar les diferències entre la disposició dels elements en la malla quadrada i la hexagonal.

3.4.1.3 *codi*

El codi que permet controlar la generació de les malles parteix sempre de la quadricula i en el cas del panell quadrat es tradueix directament la quadricula a un model tridimensional de la mateixa, però en el cas de la malla hexagonal cal un post processat de la quadricula per obtenir tots els punts que ens permetran situar els panells. Com el codi del cas hexagonal és

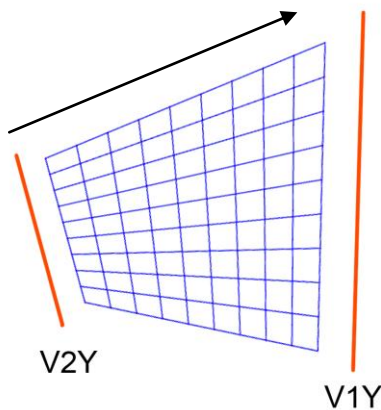
relativament complex prefereixo tractar el codi que descriu la definició de la quadricula base, que com veurem no és tant senzill com caldria esperar.

```

8678     for (int i1 = 0; i1 < DefX.Val; i1++)
8679     {
8680         for (int i11 = 0; i11 < DefY.Val; i11++)
8681         {
8682             float prx = (float)i1 / (float)(DefX.Val - 1);
8683             float pry = (float)i11 / (float)(DefY.Val - 1);
8684             float ddx;
8685             float ddy;
8686
8687             Vector Vecx = new Vector();
8688             Vector Vecy = new Vector();
8689
8690             Vecx.dx = -V1X.dx;
8691             Vecx.dy = -V1X.dy;
8692             Vecx.dz = -V1X.dz;
8693
8694             Vecy.dx = -V2Y.dx * (1 - prx) - V1Y.dx * prx;
8695             Vecy.dy = -V2Y.dy * (1 - prx) - V1Y.dy * prx;
8696             Vecy.dz = -V2Y.dz * (1 - prx) - V1Y.dz * prx;
8697
8698             ddx = (float)Math.Sqrt((Vecx.dx * Vecx.dx) + (Vecx.dy * Vecx.dy) + (Vecx.dz * Vecx.dz));
8699             ddy = (float)Math.Sqrt((Vecy.dx * Vecy.dx) + (Vecy.dy * Vecy.dy) + (Vecy.dz * Vecy.dz));
8700
8701             Vecx.Normalize();
8702             Vecy.Normalize();
8703
8704             double X1 = X + Vecx.dx * prx * ddx + Vecy.dx * pry * ddy;
8705             double Y1 = Y + Vecx.dy * prx * ddx + Vecy.dy * pry * ddy;
8706             double Z1 = Z + Vecx.dz * prx * ddx + Vecy.dz * pry * ddy;
8707
8708             GenerateCoorPt(X1, Y1, Z1, 1, NewGroup.Val, InnerActive.Val);

```

Fig 63. A dalt codi que controla la generació de malles, a baix esquema de les direccions principals.



Tal com es veu el codi per generar la quadricula presenta una dificultat afegida que neix del fet de que les direccions de la malla, per un quadrilàter qualsevol, no són homogènies de manera que les direccions canviaran per cada fila i per cada columna. Per trobar aquestes direccions cal tenir en compte, doncs, en quina fila i quina columna estem. A les línies **8682** i **8683** busco precisament aquesta informació en dividir els valors *i1* (que correspon al recorregut horitzontal) i *i11* (que correspon al recorregut vertical) pel nombre total de posicions de la malla per al sentit X i pel sentit Y respectivament.

D'aquesta manera si estic a la posició inicial *x*, llavors "prx" valdrà 0 i si estic a la posició final "prx" valdrà 1 i el mateix s'aplicaria a "pry". A les línies **8687** i **8688** defineixo dues variables de la classe "Vector" que tenen tres variables internes *dx*, *dy* i *dz* que ens serveixen per desar un vector. Aquestes dues direccions seran precisament les que ens permetran situar el punt de la malla a la seva posició, però només ens caldrà variar un dels dos vectors mentre l'altre seguirà fix a cada iteració. Per entendre-ho només cal mirar la figura amb la malla en la qual mentre la

direcció x (negre) es manté constant, la y (vermella) anirà variant a cada nova posició des de V2Y fins a V1Y. Així, doncs, la direcció x es defineix a les línies **8690**, **8691** i **8692**, i com es pot observar cap variable corresponent a "prx" o "pry" l'altera, però en el cas de la direcció y (línies **8694**, **8695** i **8696**) la direcció passarà gradualment de ser V2Y a V1Y. La proporció que determinarà quina la proporció que correspon a cada vector y és "prx" que ens indica en quin punt del vector x estem de manera que quan sigui 0 prevaldrà V2Y i quan sigui 1 prevaldrà V1Y. Un cop determinades les dues direccions calculem la distància total dels vectors (línies **8698** i **8699**) i fet això fem que els dos vectors sigui unitaris (línies **8701** i **8702**). Finalment trobo la posició del node (X1, Y1 i Z1) en sumar a la posició inicial (X, Y i Z) més la posició del primer vector (Vecx) multiplicat per la distància total en x (ddx) i multiplicat per la proporció que li pertoca segons la posició x (prx) i sumo també el vector y (Vecy) multiplicat per la distància y (ddy) per la proporció en y (pry). Aquest càlcul el podem veure a les línies (**8704**, **8705**, i **8706**). Si ens hi fixem el fer una malla quadriculada que pugui respondre a qualsevol quadrilàter ja es mostra molt més complicat del que podria semblar en un primer moment, però en el cas de les malles hexagonals aquesta dificultat s'aguditza en requerir que es repeteixi una estructura complexa que un cop encaixada doni lloc a una malla d'hexàgons a l'espai. El procés complet es pot trobar en el codi del programa ¹⁶⁵.

3.4.1.4 Control de malles dinàmiques

El control de les malles fent servir sistemes dinàmics canvia radicalment respecte als estàtics ja que aquesta estratègia planteja un control generalitzat, en el qual les accions de l'usuari es veuen amplificades pels camps de força. Gràcies a això apareix l'oportunitat única de controlar nombres ingents de dades de manera coherent i pautada. Dins d'aquest sistema podem escollir lliurement diversos tipus de control de la malla a partir de la distribució dels punts actius i els punts inactius. Generalment el mètode més còmode de tots és deixar els vèrtex extrems de la malla com elements inactius fent que tota la resta de nodes actius s'interpolin entre ells automàticament. Aquest mètode pot anar combinat amb una funció d'adhesió a una recta amb la qual mantenim tota la vora alineada. Un altre mètode és fixar tots els punts d'algunes de les vores de manera que podem crear fàcilment estructures similars a semi cilindres. També és possible bloquejar alguns dels vèrtex centrals de la malla de manera que obtenim estructures de voltes, etc. Per tant les possibilitats de control són molt extenses i ens permeten reproduir un ventall prou important de casos simples en arquitectura.

¹⁶⁵ Veure annex 4 a partir de la Línia 7920

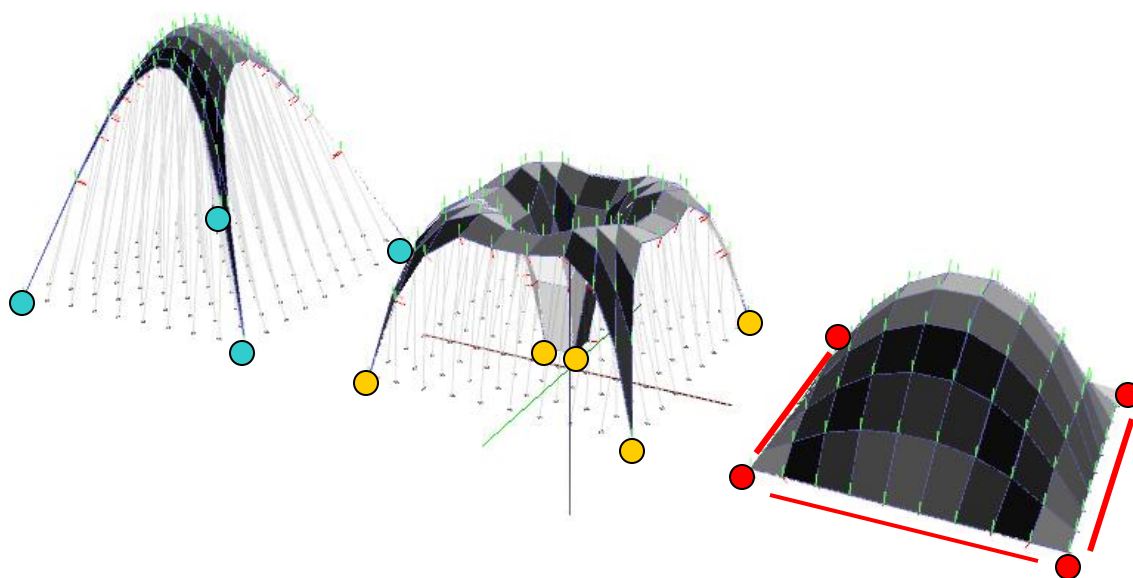


Fig 64. Diferents casos de control de la malla, per les vores i cordes tènsils(esquerra), cordes rígides i bloqueig de punts extrems i centrals (centre), o bloqueig de tota la vora (dreta).

Així, doncs, mitjançant la distribució dels punts actius o inactius de la malla podem definir un sistema de control o un altre fent que els punts que estan actius s'interpolin de forma previsible entre els punts que estan inactius. Per altra banda també establim control sobre la malla associant els seus vèrtex a funcions dinàmiques vectorials, del pla. Però la part més interessant neix en vincular les malles a SPLINES o superfícies NURBS. Com veurem més endavant aquesta vinculació permet realitzar un procés de panel·lització de la superfície corba fent-la construïble i per tant donant-li una aplicació directa al sistema. Aquesta vinculació a més permet obtenir panells de formes molt interessants que de vegades són similars a casos naturals coneguts i altres donen lloc a lògiques orgàniques de cert interès formal.

3.4.2 Volums mallats

Per extensió del sistema de malles es poden generar elements volumètrics basats en el mateix principi que ens permetin aprofitar la capacitat de control dinàmica en elements volumètrics. Aquesta aproximació permet comprovar la capacitat d'adaptació dels sistemes dinàmics des d'una perspectiva volumètrica, de tal manera que obre la porta a reproduir tot un ventall nou de formes i a plantejar ràpidament esquemes estructurals més complets a partir d'una funció relativament senzilla. Una col·lecció nova de fenòmens té lloc en el moment en el qual comencem a treballar amb aquest mecanisme, perquè el concepte de superfícies mínimes per

exemple es transforma per convertir-se en volums mínims. De la mateixa manera molts altres fenòmens pateixen transformacions interessants des del punt de vista del disseny i l'optimització formals. Molts dels principis que hem observat en les malles és poden fer extensius per a la generació i control d'aquests cossos cosa que en facilitat la implementació en ser únicament una extensió en tres dimensions de les casuístiques observades per a malles planes. Val a dir que hi ha hagut un important esforç per fer que les funcions poguessin actuar per igual en dues i en tres dimensions. A causa de que la generació d'elements volumètrics afegeix una nova complicació al fet de generar la malla només hem plantejat aquest cas per a tipologies quadrades i hem deixat de banda les malles hexagonals o les lliures per confeccionar aquesta mena d'element. En aquest sentit és un primer experiment que ens permet començar a explorar les dificultats i les possibilitats que ens planteja aquesta mena d'element dinàmic tant a nivell de generació com de control.

3.4.2.1 *Generació de cubs mallats*

Per crear un volum mallat demano cinc vèrtex a l'usuari, quatre com si fos una malla quadrada convencional i un cinquè que ens dona l'altura. A partir d'aquests cinc vèrtex puc completar les dades per tenir els vuit vèrtex que calen per definir un cub a l'espai. Amb aquests vuit vèrtex puc crear les sis cares del cub com a malles que descriuran un element volumètric tancat. Un cop hem fet això obtenim el volum mallat amb els punts de control a les vores i al qual li podem aplicar les diferents propietats que abans hem esmentat per a les malles, com fer les cordes elàstiques o rígides, etc.

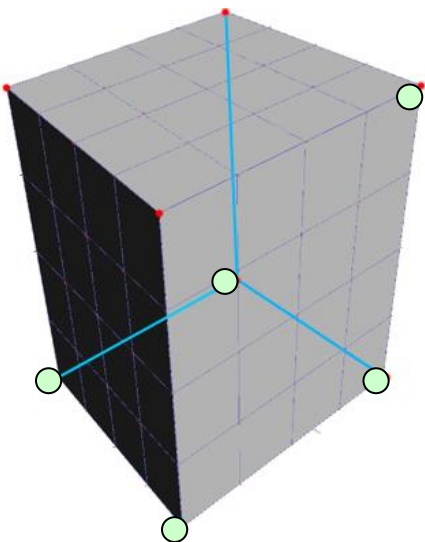


Fig 65. Exemplificació de la generació d'un cub a partir de malles, en verd s'han indicat els punts que dona l'usuari i en vermell els que dedueix el mateix sistema. A partir dels vuit punts finals és generen les malles corresponents.

3.4.2.2 El control d'elements volumètrics

Així com hem fet en el cas de les malles el control és fa generalment a partir dels vèrtex extrems els quals són partícules estàtiques que poden ser desplaçades igual que en qualsevol eina CAD. Per altra banda les vores es mantenen alineades a partir de funcions vectorials d'adhesió a rectes que ens permeten mantenir les vores alineades. El tipus de barres també es poden modificar per fer que l'estructura estigui composta de barres elàstiques o rígides de manera que podem simular estructures tènssils en elements volumètrics obtenint ja no superfícies sinó volums mínims que són el fruit de que totes les malles es relliguin alhora reduint la seva superfície al mínim. Així, doncs, es fan directament extensives les tècniques emprades en les malles superficials per a casos volumètrics tridimensionals sense gaire més dificultats.

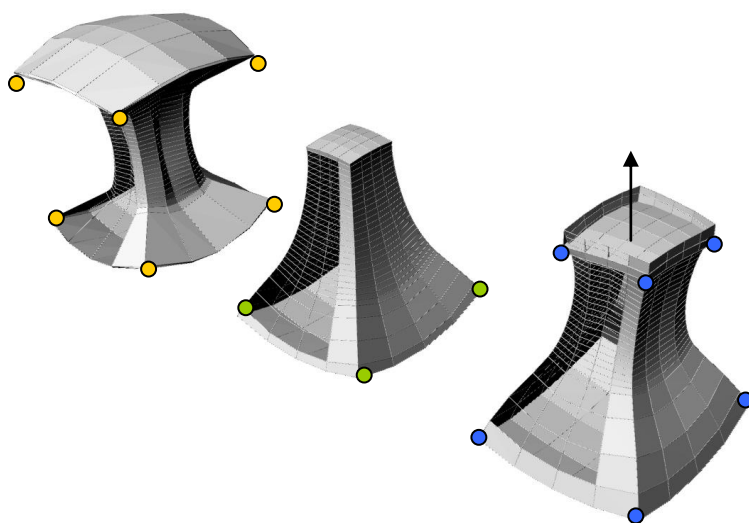


Fig 66. Exemple de volumetries basades en la malla, en les quals s'ha donat un fenomen de superfícies mínimes en tres dimensions donant com a resultat volum mínims. No s'han fet retocs importants excepte l'eliminació involuntària d'una sèrie de plans en una de les cares. Tots els casos són variants de la mateixa estructura, amb l'única excepció que en el cas de la dreta s'hi ha afegit una força ascendent que donat lloc a una formació de cert interès.

3.5 Procediments bàsics d'edició de malles

Quan treballem en la fase de disseny acostumem a necessitar sistemes molt oberts amb els quals poder plantejar moltes propostes de manera àgil. Però al mateix temps també necessitem que a mesura que avancem en el projecte es pugui incrementar el nivell de detall fins al nivell necessari. Normalment aquests dos requeriments entren en conflicte ja que els models ràpids acostumen a ser menys detallats, mentre que els models detallats acostumen a ser lents i fan servir mètodes que no són àgils. Això fa que els sistemes que són capaços de fer ambdues coses siguin programes molt extensos amb una gran varietat d'elements i opcions que no admeten un grau d'automatització gaire extens, amb un ús gens intuïtiu i que alguns cops cal que siguem nosaltres qui els programem "in situ". Els sistemes dinàmics plantegen el problema d'aproximar el model progressivament aprofitant tots els avantatges del dibuix convencional en

CAD i al mateix aprofitant les simulacions físiques com a sistema que permet aprofitar la capacitat de computació durant la generació del model fent que les accions de l'usuari es facin extensives a tot el model. En aquest sistema podem plantejar estructures rígides o estructures flexibles i fer servir diferents funcions dinàmiques per mantenir o condicionar la forma del model. Així, doncs, a mesura que anem combinant forces i les anem ajustant el problema pot resoldre's seguint una metodologia en la qual primer treballem amb elements més imprecisos i poc a poc anem consolidant els resultats. En aquesta estratègia el fer servir elements predeterminats permet agilitar el procés de modelatge i al mateix temps estalviar la feina que implica detallar-los. Aquesta estratègia en eines de CAD convencionals no és possible, perquè requereix tot un replanteig del flux de treball però en sistemes dinàmics si és possible mantenir parcialment la concepció de treball del CAD tot incloent estructures predeterminades. De cara a l'edició d'elements compostos descriure en detall el control de la malla perquè és el cas més habitual i perquè engloba molts altres casos particulars.

3.5.1 Vores

Un dels conflictes més importants dels sistemes tènils aplicats a malles és el control de vores. Com veiem a la figura, quan tenim una malla tènfil la tendència natural d'aquests sistemes és a no mantenir la linealitat de les vores i per tant a deformar considerablement la forma original. A la següent figura es pot veure com la malla tènfil perd completament la forma i això fa que com element de disseny moltes vegades no ens serveixi perquè nosaltres mentalment estem treballant amb elements més pròxims a una malla rígida com seria el cas de la dreta.

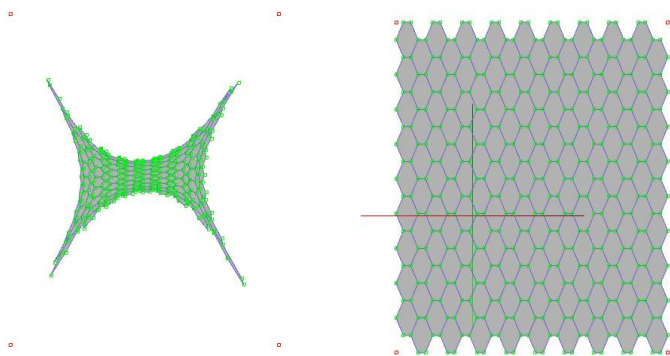


Fig 67. La següent figura mostra dues malles hexagonals amb opcions molt diferents. Mentre la de la dreta és una malla rígida, la de l'esquerra és una malla composta de barres tènils.

D'alguna manera necessitaríem que les vores de la malla quedessin perfectament alineades com en el cas de la dreta sense perdre la capacitat d'adaptació que tenim en el cas de l'esquerra. La solució arriba quan apliquem una funció vectorial a les vores. Si recordem el que feia aquesta funció (alinear tota una sèrie de punts sobre la mateixa recta) ens adonarem que pot ser ideal per mantenir les vores del nostre element alineades sense perdre la capacitat de la malla per

adaptar-se a qualsevol superfície. Tot i això, encara que apliquem la funció vectorial, com que estem treballant amb un sistema de forces, la tensió interna de retracció i la força vectorial es mantindran en un cert equilibri entre elles en el qual cap de les dues prevaldrà. El resultat serà un estat a mig camí del que volem obtenir en el qual les vores estaran menys deformades que en el cas estrictament tènsil però tampoc perfectament alineades. Per Solucionar aquest conflicte podem fer servir una solució extremadament senzilla i que ens permetria solucionar tots els casos sense majors dificultats que passaria pel control de la massa dels punts de la vora. Si recordem que en treballar amb sistemes dinàmics és pot augmentar la massa d'uns punts respecte als altres de manera que tinguin més o menys inèrcia ens adonarem que els punts de la vora es poden veure poc o gens afectats per les interaccions amb els punts interns de la malla si simplement els augmentem la massa.

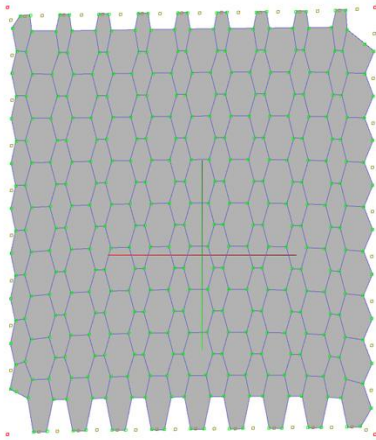


Fig 68. La següent figura mostra una malla hexagonal amb la vora controlada per una funció vectorial. No s'observen deformacions gaire significatives degudes a la tensió interna de les cordes, tot i que si podem arribar a notar una certa curvatura. En qualsevol cas aquesta problema es pot controlar incrementant encara més la massa dels punts de contorn.

Fent això farem que els vèrtexs i les forces que en ells actuen prevalguin sobre les altres interaccions i el resultat serà una malla adaptable amb vores més o menys alineades segons el valor de massa que els donem. En la següent figura veurem el cas d'una malla en la qual s'han augmentat les masses dels

punts de contorn que estan subjectes a una funció vectorial. En aquest exemple però també podrem observar altres fenòmens peculiars com per exemple que en fer prevaler significativament les forces vectorials de les vores sobre les demés interaccions, els panells interns deixen de ser tots iguals i canvien la seva forma seguint alguna mena de patró fruit de la combinació de forces. Cal analitzar el comportament de les barres per poder dir per què té lloc aquesta mena de fenomen. En general a les vores de la malla s'igualen longituds que en aquest cas pertanyen a diferents parts de l'hexàgon (la vora i l'altura) de cada panell. En un Hexàgon regular aquestes mesures són lògicament diferents però en quedar igualades a la vora els hexàgons perden la seva regularitat. Com veurem més endavant, hi han maneres de forçar als panells a no perdre la seva configuració i que es mantinguin regulars independentment de les forces que intervinguin però en un primer moment el resultat seria aquest.

3.5.2 Forats

Una dels recursos més immediats que tenim en treballar amb panells és generar obertures, cosa que resulta extremadament senzilla perquè només cal eliminar un vèrtex i el programa ja elimina també els plans i barres associats al mateix. En fer això el comportament dinàmic de la peça canvia perquè hem eliminat alguns dels elements que estaven actuant en el conjunt de la malla. Quan això passa les carregues es distribueixen de nou i tenen tendència a moure's al voltant del nou forat de manera que la morfologia canvia. Segons les característiques de les cordes que formen la malla el efectes de l'obertura d'un nou forat seran diferents. Si les cordes són rígides no notarem canvis especials en el conjunt de la malla perquè les longituds estan fixades. Però si les cordes són elàstiques el que passarà serà que els forats s'arrodoniran a causa de la força de retracció interna del conjunt. En aquests casos la malla distribueix les tensions perquè totes les barres treballin igual i en aquest procés les obertures tendeixen a arrodonir-se.

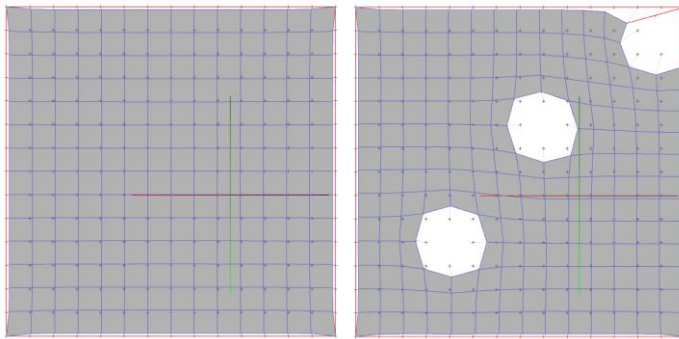


Fig 69. A la figura es pot veure una malla tènsil en el seu estat inicial, (esquerra) i el seu estat final un cop hem eliminat alguns vèrtex. Tal com es pot veure a la figura les obertures s'han arrodonit.

La redistribució de tensions té lloc de manera quasi immediata en el moment que eliminem algun dels vèrtex. Com que en el cas de les malles les tensions corren per un conjunt relativament regular, les irregularitats tenen un impacte significatiu especialment pel fet de que tallen l'única via per la qual les tensions poden transmetre's que són les barres. En fer-ho aquestes deixen de poder actuar com arcs perquè estan tallats en algun del seus punts i passen les tensions als elements del seu entorn.

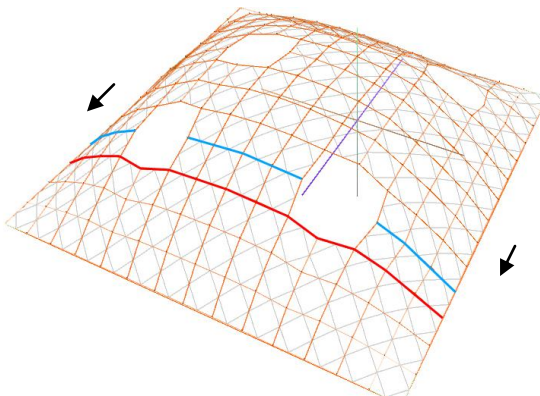


Fig 70. Tal com es mostra a la figura en obrir dues obertures hi ha un arc (de color blau) que queda tallat en dos punts i passa les seves càrregues a l'arc següent de manera que sobrecarrega les vores. El procés té lloc de manera quasi immediata en el moment en el qual obrim una nova obertura i per tant podem preveure els efectes estructurals en el mateix moment de dissenyar.

3.5.3 NURBS

També hem donat l'opció de generar malles directament sobre superfícies NURBS de manera que puguem panel·litzar una curvatura complexa aprofitant les capacitats d'optimització dels sistemes dinàmics. En aquests casos es fa servir la funció d'adhesió a superfícies NURBS de manera que la malla sempre es mogui seguint la superfície. A mesura que anem deformant aquesta els panells s'aniran deformant seguint el moviment de la superfície. Un dels avantatges d'aquest mecanisme és que tot el que hem vist sobre edició de malles fins ara segueix sent igualment vàlid en aquest cas ja que únicament hem afegit un funció d'adhesió i hem retingut totes les propietats anteriors.

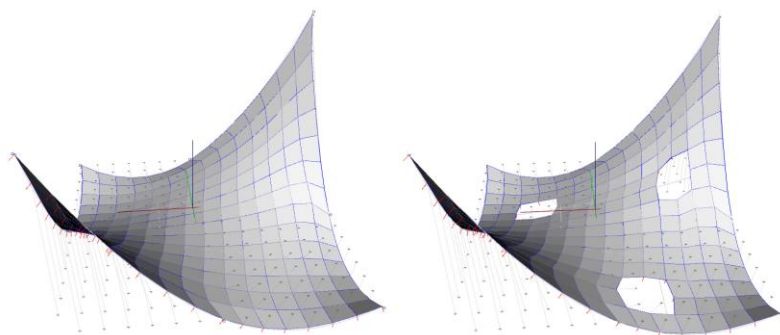


Fig 71. Exemple de malla sobre superfície NURBS. Tal com podem veure es poden obrir obertures sobre la mateixa sense dificultats.

Totes les classes de malla es poden adherir a una superfície NURBS sense especials dificultats perquè en realitat la força d'adhesió només actua sobre els vèrtex i no distingeix entre geometries. El que sí pot variar segons la geometria és la capacitat de les malles per adaptar-se a les curvatures que imposa la NURBS perquè mentre les malles hexagonals presenten una gran capacitat d'adaptació, les malles quadrades són molt més rígides. També els sistemes tènsils es poden aplicar sobre aquest cas fent a les cordes elàstiques i donant-los una tensió interna de retracció, però això interfereix amb la funció d'adhesió sobre la NURBS de manera que la malla no seguirà amb tanta precisió la curvatura. Recordem que les forces es combinen i donen lloc a un resultat que intenta equilibrar totes les tensions entre si. En afegir una nova força cal tenir en compte com respondran les altres a la nova acció de manera que si volem ajustar la malla amb tota precisió en molts casos haurem de controlar la intensitat dels camps de força perquè una acció prevalgui sobre les demés.

3.6 Eines i procediments bàsics de modelatge convencional

Com ja hem explicat anteriorment el modelatge en aquest programa es basarà en dues classes de geometria, l'estàtica i la dinàmica, que combinats permetran confeccionar models dinàmics. A partir de la possibilitat d'activar o desactivar el comportament dinàmic podem alternar i combinar geometries estàtiques i geometries dinàmiques en un únic model. Així amb una única estratègia de treball englobem ambdós casos i obtenim elements que retenen les millors propietats de tots dos camps en ser controlables a partir d'elements estàtics i adaptables a partir d'elements dinàmics. Partint d'aquesta estratègia es poden plantejar una gran varietat de situacions arquitectòniques que van més enllà dels casos típics basats en sistemes tènssils i que tenen l'ambició de fer-se el més extensius possible.

Per poder construir el model començarem per definir una geometria estàtica i per tant necessitarem eines de modelatge tradicionals que ens permetin modelar amb facilitat els sistemes de barres, plans i corbes o superfícies que definiran la geometria inicial. Per raons de temps no hem pogut desenvolupar un sistema complet de dibuix CAD i tampoc era l'objectiu de la tesi el fer-ho, però si hem pogut detectar algunes variacions en l'ús d'aquestes eines causades per l'aplicació d'un nou plantejament al sistema de modelatge. A causa de que els sistemes dinàmics poden dominar estructures complexes amb molta facilitat, els requeriments de dibuix convencional es modifiquen ja que no cal poder dibuixar elements molt detallats sinó més aviat poder plantejar de manera ràpida estructures relativament complexes i repetitives. El punt de partida natural del model dinàmic no són les rectes ni els punts, com fèiem en els dibuixos de CAD, sinó estructures bàsiques que es puguin adaptar a una gran varietat de casos. Aquest fet generarà una certa tendència a automatitzar processos i a crear estructures prèviament configurades en abundància, ja que aquestes seran la base a partir de la qual treballarem. Més endavant s'adaptaran aquests elements a les diferents situacions del model manipulant els punts de control. Així tenim un plantejament diferent de les eines de dibuix en el qual la tendència general és cap a la automatització dels processos més que no pas cap a les funcions puntuals i precises. Treballant amb estructures predeterminades és possible perquè la tasca de modificació sigui molt més eficient de manera que necessitarem eines que ens permetin plantejar ràpidament aquestes geometries i que en programes convencionals no tenen el mateix interès perquè el plantejament del modelatge és diferent.

Les eines de dibuix convencionals tal com el desplaçament, la rotació, la copia, l'extrusió, etc. hi seran presents però de cara a la descripció dels mecanismes de dibuix estàtics les passaré per alt ja que són prou conegudes i ens centrarem en explicar aquelles que han nascut com a fruit de les necessitats específiques dels sistema de modelatge dinàmic. Aquestes funcions tenen en

molts casos per objectiu l'acceleració i optimització de la generació de models predeterminats i requereixen de processos més elaborats que els habituals.

3.6.1 Fusió de punts

Aquesta funció detecta punts propers i els fusiona segons un marge determinat o bé fusiona dos punts directament indicats per l'usuari. Aquest mecanisme és molt important de cara al control dinàmic ja que la coherència estructural dels elements en les simulacions dinàmiques, a diferència dels sistemes estàtics, és essencial. Com ja passa en els programes d'estructures les connexions tenen efectes directes sobre els resultats i si no estan ben plantejades produeixen errors. Si bé en els programes de CAD és habitual que es presentin situacions en les quals diversos elements estiguin sobreposats o que dues rectes que semblen estar connectades en realitat no ho estiguin sense que això tingui més efectes, en els programes de simulació aquests fenòmens donen lloc a errors i tenen efectes molt notables. Aquests fet obliga a que els models fets amb aquest sistema hagin de ser molt purs en la seva geometria i en aquest context ens calen eines que ens permetin depurar el model.

En la generació de malles coherents a nivell dinàmic aquesta funció juga un paper essencial ja que permet depurar la malla en fusionar aquells punts que caiguin a la mateixa posició, cosa que facilita enormement la generació de malles o elements volumètrics mallats. Especialment important és el fet de poder plantejar una sèrie de panells independents entre ells situats de manera que es sobreposin les seves vores i llavors poder-los fusionar d'un sol cop gràcies a la fusió dels vèrtex coincidents, donant peu a la generació d'una nova malla. Per a cel·les complicades com la hexagonal i per casos complexos com els volums mallats aquest sistema es fa servir internament però té la seva versió externa perquè l'usuari també pugui fusionar vèrtex. En conjunt aquesta funció agilita enormement la generació de models de malla tant per part de l'usuari com per a l'ús intern del programa.

3.6.2 Intersecció

Aquesta és un altra de les funcions que s'ha demostrat molt necessària a l'hora de generar estructures personalitzades degut al fet de que permet construir una malla a partir de diverses rectes que únicament es tallin. El que fa la funció és agafar una sèrie de rectes indicades per l'usuari, comprovar si es tallen i llavors, si una recta té interseccions la subdivideix. El resultat és que obtenim totes les rectes automàticament tallades per les interseccions i formant un teixit

coherent. S'aplicarà també la funció de fusió de punts propers per fer que les rectes que es tallen en un mateix punt vagin a parar al mateix vèrtex. A partir d'aquí podem indicar fàcilment els punts de control per començar a treballar amb la malla a nivell dinàmic, seleccionant i diferenciant els punts de control dels punts lliures. També es pot fer servir aquest mecanisme per aplicar-lo com a mètode de dibuix clàssic cosa que permet generar xamfrans i altres casuístiques pròpies del dibuix per ordinador. Però no ha estat pròpiament pensat per dibuixar d'aquesta manera sinó més aviat per plantejar estructures. De cara a millorar la capacitat de dibuix es podrien fer variacions de la funció que permetessin adaptar l'eina al dibuix convencional per incloure models més detallats que en un primer moment no han estat necessaris.

3.6.3 Generació de malles quadrades de contorn lliure

Un altre funció que ens pot accelerar el procés de definició d'estructures personalitzades és el desenvolupament d'un mecanisme que permeti generar una malla quadrada a partir de qualsevol contorn, això vol dir que amb qualsevol nombre de costats i qualsevol configuració de la vora el sistema et construeixi una malla delimitada pel mateix. El mecanisme ha estat aplicat a malles de forma quadrada perquè és una malla molt fàcil de treballar i simplifica molts problemes que amb altres tipus de cel·la poden tornar-se molt complexos. Un dels inconvenients d'aquest sistema és que a les vores trobarem casos en els quals la malla quadrada, en quedar tallada pel contorn, deixarà de forma quadrats per formar triangles, quadrats degenerats o fins i tot pentàgons i hexàgons. Aquest és un problema de difícil solució ja que en treballar amb contorns lliures es fa difícil dir quina seria la configuració correcta, de totes maneres els sistemes dinàmics tendiran a transformar aquests elements de control en la disposició més equilibrada independentment de la seva forma original. Això vol dir que encara que sigui un pentàgon, si la forma més equilibrada és el triangle alinearà els costats fins a obtenir-lo. Aquest avantatge dels sistemes dinàmics permet optimitzar amb molta facilitat les estructures ja que no requereix d'un model perfectament definit, sinó d'un model aproximat que el mateix simulador pot fer convergir cap a una configuració adequada. Val a dir que en aquesta funció participen igualment funcions d'intersecció i de fusió de punts de manera que gràcies a que s'han desenvolupat aquest tipus de funcions es van obrint les portes a automatitzar la generació d'estructures més complexes. Un altre punt important és que el sistema de control d'una malla d'aquestes característiques ha de ser definit per l'usuari perquè amb aquestes morfologies no es fàcil establir una norma de control general.

També en la línia de generar eines que permetin plantejar estructures de la manera més pràctica possible hem desenvolupat una funció que troba tots els contorns presents dins d'una estructura de barres qualsevol i hi posa automàticament plans a cadascun dels espais detectats. Aquest sistema permet plantejar malles lliures compostes de plans amb molta facilitat i amb qualsevol

configuració. A partir de la funció d'intersecció o de malla que hem vist anteriorment es poden produir amb relativa facilitat models de malla de forma irregular i comprovar quin és el seu comportament dinàmic, cosa que fins ara no era possible.

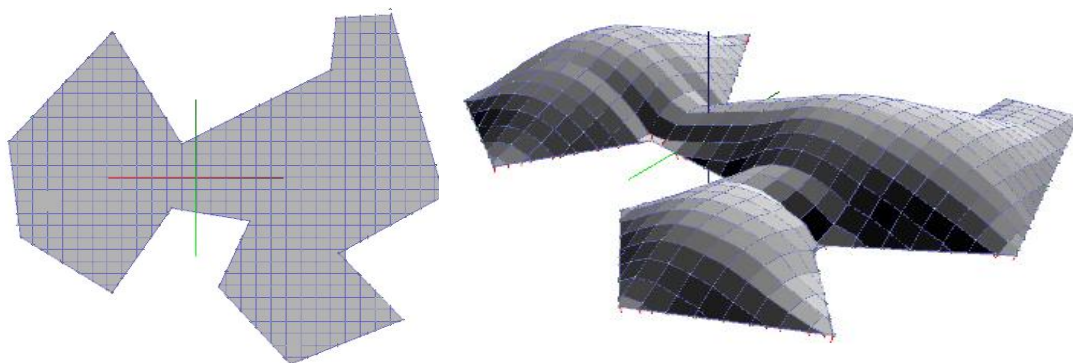


Fig 72. Exemple de malla de contorn lliure en planta (esquerra) i elevada a partir del sistema dinàmic (dreta)

3.6.4 Generació automàtica de plans

Però en el moment que hem de posar plans a cadascuna de les cel·les ens trobem que aquest pas requereix d'una feina molt tediosa i lenta en la qual hem d'anar dibuixant un a un cadascun dels elements, i tenint en compte que una malla pot tenir centenars de plans aquest procés pot tornar-se extremadament llarg. A partir d'aquesta funció podem automatitzar aquest procés obtenint un resultat ràpid que en cas de tenir algun error és fàcil de corregir. Un dels avantatges d'aquest mètode és que estalvia molt de temps de treball a l'hora de generar plans sobre malles que han estat laborades manualment i no per mitja d'algun mètode prèviament configurat.

3.6.5 Extrusió

De cara a la generació d'estructures tridimensionals ha calgut afegir la funció d'extrusió però amb algunes modificacions respecte als sistemes clàssics de treball deguts a la necessitat de plantejar estructures més que no pas elements geomètrics. En aquest sentit han aparegut algunes variacions sobre la mateixa funció que permeten definir com serà el resultat. En general aquests sistemes et permeten agafar un pla i transformar-lo en un element volumètric com per exemple un cub. En el nostre cas, tot i tenir aquesta possibilitat, hem modificat la funció perquè es puguin definir la configuració de les cares laterals i que no tinguin perquè ser necessàriament plans, sinó que puguin ser per exemple barres creuades. Tot i que en aquest cas deixarem de definir un element volumètric tancat, ens pot ser útil a l'hora de definir alguns tipus d'estructura

en la qual necessitem posar plans horitzontals “suportats” per estructures de barres laterals, similar al que es fa en algunes estructures.

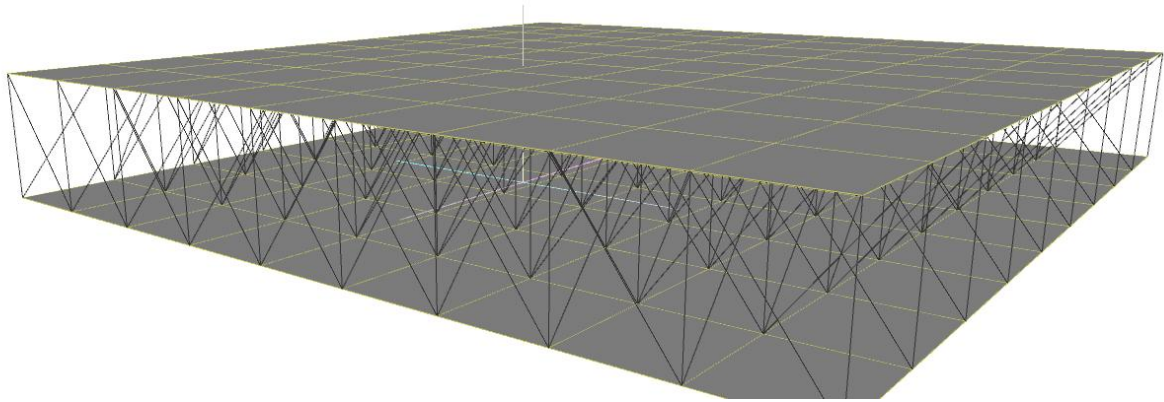


Fig 73. Extrusió d'una malla en la qual s'han configurat les cares laterals com a estructures de barres

Tesi doctoral. **Els sistemes cinètics com a eina de disseny en arquitectura.**

Programa d'aplicació dinàmica

4 Estudi de disseny bàsic amb camps de força

A partir dels camps de força es poden desenvolupar estratègies de disseny amb les quals obtenim resultats amb característiques formals completament diferents. Normalment aquests estan molt relacionats amb la metodologia que fem servir ja que no els crearem directament nosaltres sinó que posarem les condicions necessàries perquè "sorgeixin" de manera espontània i per tant els mètodes que emprem seran absolutament determinants. Aplicant aquesta estratègia de disseny obtenim un "estil" particular similar a les formes naturals a causa de que el sistema de funcionament i les lleis que regeixen els processos que tenen lloc durant el modelatge guarden similituds importants amb els processos naturals establint una relació entre la forma i el mètode a analitzar. Fixem-nos que en tots els casos els models plantegen la forma com el resultat de la resolució d'una tensió interna que ha de quedar equilibrada per mitja d'una configuració formal adequada. Val a dir que a l'arquitectura el projecte acostuma a presentar també una tensió interna entre el programa i la forma, que l'arquitecte ha de resoldre a partir d'una sèrie de criteris, i en el cas present el que trobem és que aquesta tensió interna entre els camps de força i la forma també planteja un problema del que sorgeix una solució formal que de vegades pot ser imprevisible. Des d'aquest punt de vista, doncs, la capacitat per generar una tensió i resoldre-la és la clau que dóna qualitat a l'arquitectura. Val a dir que, tal com hem vist, hi han importants arquitectes que per resoldre problemes estructurals i estètics han fet servir mecanismes basats en models físics de manera puntual, però ara es planteja la possibilitat de fer-ho de manera molt més general.

El mecanisme que fa que tot això sigui possible es basa en sistemes iteratius de càlcul que poden resoldre problemes de molta complexitat pas a pas. En aquests casos les persones ens hem de dedicar a proposar el problema de la millor manera possible i veure quin resultat obtenim dels sistemes d'iteració, si aquest ens resulta satisfactori el podem preservar i si no el podem modificar amb molta facilitat. Per tant a continuació es presenten diferents mètodes de plantejar un problema formal en un sistema dinàmic i obtenir solucions concretes que poden ser aplicades en arquitectura. Potser el cas més immediat de simulació són els sistemes tènssils que es poden obtenir fàcilment a partir de malles, tot i això a causa de la llibertat de moviments que hem intentat mantenir en el programa també han aparegut fenòmens nous que han plantejat noves possibilitats de disseny (com hem vist quan es plantejaven els cubs formats per malles). Anteriorment ja s'havien fet servir sistemes dinàmics per resoldre problemes en estructures tènssils basant-se en la relaxació dinàmica¹⁶⁶ però es feia de manera puntual per aquesta finalitat.

166 Kilian, A., Ochsendorf, J., "Particle-spring systems for structural form finding", 2005, *Journal of the international association for shell and spatial structures* (J. IASS), Vol. 46 No. 2 August n. 148, P. 77-84

Ara es planteja aquest mecanisme sistemàticament com a eina de disseny general en la qual amb un motor únic de simulació es puguin aprofitar les capacitats potencials d'un mecanisme dinàmic de disseny. Per això, la relaxació dinàmica y altres processos, que fins ara havien aparegut de manera puntual, es poden combinar i aplicar de manera general sense dificultats gràcies al fet que es fa servir un sistema unificat i es poden combinar les diferents estratègies per donar lloc a comportaments més complexos, per exemple podem combinar en una única estructura un mur cortina amb un sistema tènsil i obtenir el que seria un mur cortina tènsil. El mateix podem fer amb elements volumètrics més complexos com cubs mallats o sistemes de panells. Per exposar aquest tema amb un cert detall hem classificat els casos segons el tipus d'estructura sobre la qual es treballa. En realitat hi ha una certa ambigüitat en això ja que com hem dit anteriorment tot pertany a un únic sistema unificat. En aquest sentit els diferents tipus d'estructures depenen del que vulguem representar i de les propietats que haguem donat per cadascun dels elements. És important fer notar que precisament les propietats dels objectes són un bon criteri de classificació perquè permeten obtenir diferents comportaments amb un únic sistema de manera que el que en altres programes serien elements diferents, aquí són les diferents propietats d'un únic objecte.

4.1 Cables de catenària

Si recordem les opcions de control dinàmic per a les barres recordarem que es podia modificar el seu comportament perquè fossin "rígides" o "elàstiques" i en el cas de ser elàstiques es podien graduar perquè tinguessin "tensió interna". Aquestes dues opcions són les que diferencien una estructura rígida de barres d'una estructura tènsil. Hem observat que quan dissenyem quasi sempre té més interès treballar amb estructures tènsils que no pas rígides perquè aquestes poden canviar ràpidament les seves mides sense perdre la tensió de manera que s'adaptin fàcilment als canvis que tenen lloc de forma habitual en les fases inicials del procés de disseny. També són lògicament útils de cara a treballar amb disseny d'estructures lleugeres de cables, ja que poden simular el comportament d'aquesta mena de sistemes sense gaire complicacions. Obtenim també de manera natural propietats geomètriques molt desitjables per aquests casos com per exemple superfícies mínimes, i a més es poden combinar amb altres requeriments com per exemple un sistema de plans a les cel·les que simuli la presència de vidres en una malla de cables de manera que no sigui simplement un sistema de malles, sinó de malles tènsils i panells. Cadascun d'aquests casos els repassaré a continuació.

4.1.1 Cables de corda rígida i de corda elàstica

En un primer moment la possibilitat de treballar amb arcs de catenària és una possibilitat inherent al sistema dinàmic que hem emprat. Per fer-ho ens podem valer de cordes sobre les quals s'aplica una força ascendent contrària a la gravetat. Si recordem el comportament de les cordes sabrem que en resposta a un canvi de longitud entre les partícules que les formen tendeixen a generar una força en el sentit contrari, de manera que arribarà un punt on l'acció externa i l'acció interna de la corda quedaran en equilibri. El conjunt acaba actuant com una corda lleugerament elàstica a la qual deixem penjar. El resultat del procés ja és ben conegut per tots i respon a un arc funicular ideal per a suportar una determinada càrrega. Però cal matisar que segons la classe de corda que fem servir el sistema dóna lloc a algunes alteracions en la forma de l'arc. En cordes de tipus tènsil els arcs tenen tendència a produir formes més aviat estirades en el sentit vertical, similars a una paràbola, mentre que les cordes rígides produeixen formes més arrodonides. Aquesta diferència és deguda a la capacitat dels sistemes elàstics per repartir la tensió equitativament per les cordes que formen l'arc, cosa que els sistemes rígids no poden fer. Per altra banda les cordes elàstiques tendeixen a repartir els vèrtexs de manera molt més uniforme ja que les tensions de les cordes s'equilibren per treballar a igual tensió i en ser la tensió proporcional a la longitud, les longituds de les cordes s'igualen i el resultat és un arc funicular simètric i regular. En canvi en el cas de cordes rígides les diferents longituds donen lloc a asimetries en la forma de l'arc.

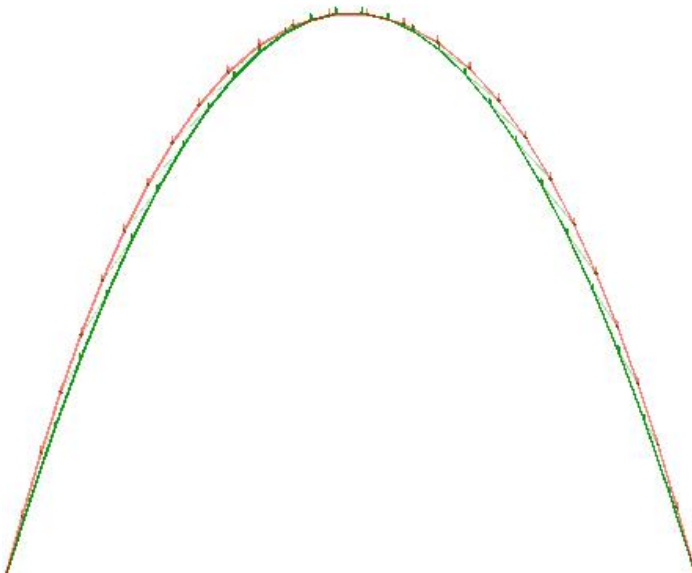


Fig 74. Diferències entre un arc funicular de corda elàstica (verd), i un de corda rígida (vermell). Com podem veure l'arc elàstic no dóna la mateixa curvatura per a la mateixa deformació en altura.

4.1.2 Cables vinculats a NURBS

Un altre aspecte interessant dels arcs funiculars és que aquesta mena de sistema format per partícules mai dona la forma exacta de l'arc sinó que n'aproxima el recorregut a trams. Això és un problema de precisió que fins ara només es podia compensar afegint més partícules a la corda. Ara però, gràcies a la vinculació que podem establir amb els sistemes de corbes NURBS ha aparegut una solució inesperada a aquest problema ja que podem vincular tots dos objectes de manera que la corba NURBS segueixi el recorregut dels punts de l'arc funicular. Aquest mecanisme permet que amb pocs punts puguem obtenir un arc funicular de total precisió, sense necessitat de calcular grans quantitats de partícules per ajustar millor el resultat. El punt clau d'aquesta capacitat rau en el mecanisme dinàmic que desplaça els punts de control de la NURBS perquè la corba passi pels punts de pas que es corresponen als nodes de l'arc funicular. Recordem que els punts de control de la NURBS no són punts de pas. No en tots els casos les NURBS podran imitar la forma de la catenària, hi ha ocasions en les quals aquests sistemes no poden adaptar-se a la forma que li imposen els punts de pas perquè aquests estan descrivint una corba que no manté la tangència contínua per tots els seus punts, com per exemple els vèrtex d'un polígon o les punxes d'una estrella, quan això passa la NURBS es veu incapaç de reproduir la forma perquè només pot reproduir elements que tinguin tangència contínua en tots els seus punts.

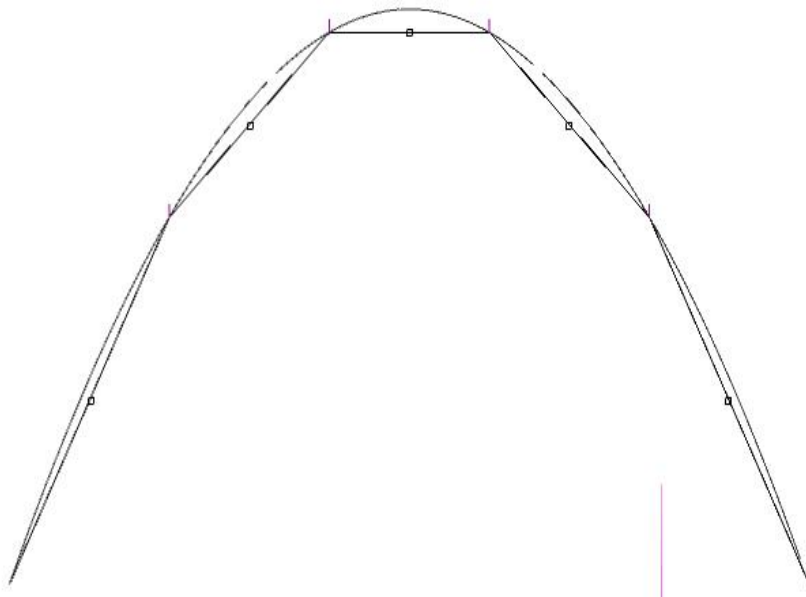


Fig 75. La següent figura mostra una corba NURBS que descriu una catenària partint de 6 punts de pas. La similitud amb una corba catenària definida per moltes partícules és quasi exacta ja que s'han comparat els resultats obtinguts amb NURBS i els obtinguts amb cordes definides per grans quantitats de punts, sent els resultats quasi idèntics.

Val a dir que aquesta limitació no es deu a l'ús de sistemes dinàmics sinó que és una limitació geomètrica del sistema de NURBS. Els sistemes dinàmics només han permès posar-la de relleu en plantejar una gran varietat de casos i portar el sistema al límit de la seva capacitat.

4.1.3 Cables amb comportaments heterogenis

Gràcies a les opcions de control també podem regular l'excentricitat de l'arc funicular modificant les opcions de tensió interna o intensitat de la força entre els nodes que formen la corda. D'aquesta manera fem que les cordes cedeixin més o menys a les tensions i que el conjunt de l'arc deformi de manera particular davant les accions externes. Com que aquestes opcions poden ser modificades per a cada corda en particular es poden combinar diverses tipologies de corda en un sol arc per obtenir elements amb configuracions combinades. El resultat acostuma a produir un model asimètric d'arc que imitaria el comportament d'un cable compost de materials amb diferents resistències. Per poder modificar les corbes només ha calgut recórrer a dues opcions de control segons si fem servir cordes rígides o elàstiques. Si la corda és rígida regulem la intensitat de la força de les barres i si la corda és elàstica regulem la intensitat de la tensió interna, així mitjançant aquests dos factors podem obtenir qualsevol combinació de resistències dins l'arc funicular. Aquest mecanisme permet treballar sobre les propietats mecàniques de les cordes ja que redueix les diferents casuístiques a variacions d'un mateix plantejament.

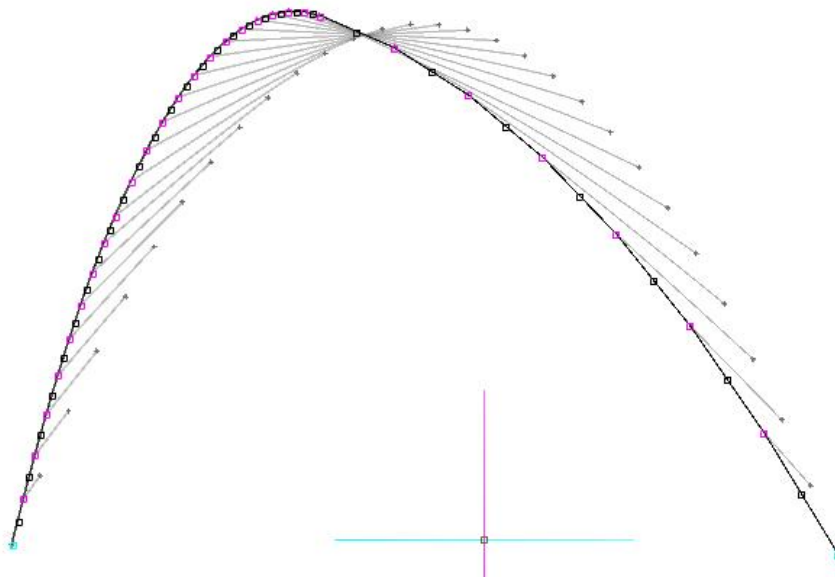


Fig 76. En aquesta figura podem veure una corba de catenària on s'han donat diferents resistències a les cordes, com es pot observar a la figura, el punt d'equilibri s'ha desplaçat cap a les cordes més resistents, a l'esquerra. Els elements en gris marquen la situació inicial d'equilibri on totes les cordes tenien igual resistència.

4.1.4 Generació de cables combinats

Aprofitant la capacitat de combinació d'elements que ens ofereix el programa es poden encadenar diversos arcs amb diferents propietats i sotmetre'ls a l'acció de les forces per obtenir models molt més complexos que els que hem vist fins ara. Així, doncs, es poden plantejar situacions anòmales com per exemple penjar cables d'altres cables i obtenir estructures funiculars combinades. Amb aquest mecanisme es poden reproduir literalment els models físics que alguns arquitectes han emprat per obtenir les voltes i els arcs dels seus projectes i com veurem més endavant això no es redueix únicament al cas dels arcs funiculars sinó que també és fa extensiu a les superfícies tèxtils quan emprem malles o a elements volumètrics.

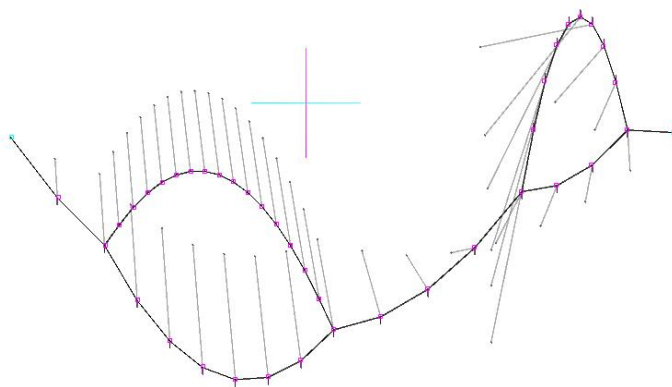


Fig 77. En aquesta figura podem veure diversos arcs funiculars combinats entre ells, però en els quals s'han aplicat forces repartides en tots el punts. Mentre que a la corda inferior s'ha aplicat una força descendent, als dos trams de corda que pugen se'ls ha aplicat una força ascendent de manera que en combinar-se donen lloc a un element més complex.

A l'exemple de la figura hem connectat diferents cordes en un sol arc combinat i els hi hem aplicat carregues repartides per cada una, mentre que la corda principal té una càrrega descendent, les altres dues tenen una càrrega ascendent, d'aquesta manera ens queda un element senzill que no es pot reproduir a la realitat, ja que no es poden generar forces generals ascendents i descendents sobre un mateix element, i menys encara fer-ho en sentits oposats a la gravetat. Així, doncs, podem crear fàcilment situacions anòmales que de vegades ni tant sols percebem i que cal tenir la precaució de detectar-les. Per altra banda, encara que de moment com que treballem sobre arcs els nostres models són bidimensionals, ara, en introduir la idea de combinar diferents elements, apareix la possibilitat de generar elements tridimensionals cosa que el programa pot assumir sense dificultats.

4.1.5 Conclusions

Veiem que els sistemes d'arcs funiculars es poden plantejar a partir d'eines dinàmiques basades en les cordes i les partícules, amb les quals podem reproduir els casos més típics i plantejar

situacions noves només modificant dues o tres propietats de les cordes. Fixem-nos que aquesta capacitat de modificar el comportament a partir de les propietats dels objectes ha estat plantejada amb la idea d'englobar el màxim nombre de casos amb el mínim nombre d'objectes reflectint l'esperit del programa que tenia com un dels seus objectius comprovar la capacitat de modelar amb sistemes generals basats en un únic motor de simulació com ja han fet altres programes (per exemple Rhinoceros basat quasi exclusivament en geometries NURBS) però ara aplicat a un cas dinàmic. S'obre també la porta a dissenyar directament sobre una plataforma digital la qual cosa podria augmentar l'eficiència dels processos de treball i unificar de nou al voltant d'un únic sistema tot el procés de disseny. Això ens estalviaria molts problemes de coherència i per altra banda podria ser la base necessària a partir de la qual generar una arquitectura pròpia dels sistemes digitals, que n'aprofiti les capacitats de manera justa i al mateix temps sigui arquitectura en tots els sentits.

4.2 Extrapolació a estructures de 3 dimensions

El generar una estructura en tres dimensions pot no ser tant intuïtiu com fer-ho en un pla, però permet plantejar situacions més complexes i explorar més possibilitats formals. En aquest sentit en treballar amb un model tridimensional que no és tant fàcil de percebre com un element pla, a més del fet d'haver guanyat complexitat, apareix el perill de perdre la noció del que estem fent i és en aquest punt on els sistemes dinàmics poden ser una eina valuosa que ens ajudi a retenir aquest control en tres dimensions. Gràcies a la capacitat dels camps de força per controlar grans quantitats d'objectes a partir d'uns principis de modificació simples, podem assegurar per a tot un conjunt unes propietats determinades i comunes. En assegurar una certa uniformitat en algun aspecte podem saber que encara que no percebem tot el model aquest complirà una condició determinada. Aquest sistema de treball permet, i en certa manera obliga, a plantejar el model des del primer moment dins d'aquesta mecànica ja que sinó el disseny inicial pateix modificacions molt importants de manera que pot quedar desvirtuat. Cal tenir en compte, doncs, que aquest sistema indueix a dissenyar des del primer moment sobre una plataforma digital cosa que fins ara no passava ja que quasi sempre que un arquitecte volia proposar un model ho feia primer en paper i després li aplicava un procés més o menys complicat per passar-ho a l'ordinador per desenvolupar la documentació tècnica. Així, doncs, aquest sistema ens permet fer directament "esbossos" amb l'ordinador, com si fossin dibuixos fets a mà però que en iniciar la simulació es comportin com una maqueta física. Aquesta aproximació al disseny només és possible amb sistemes digitals i potser és una de les maneres de generar un model de representació propi dels sistemes digitals. Si el sistema es demostrés capaç de generar dissenys de qualitat seria un avenç important perquè permetria que el procés de disseny recuperés la continuïtat que tenia

quan es treballava només a mà, i que amb la introducció dels sistemes digitals havia quedat mutilat en el moment de passar de l'esbós al plànol digital. Ara sembla que es podria obrir la possibilitat de que es recuperés aquesta propietat amb tots els avantatges que comporta un sistema digital, tant a nivell de control mètric com d'eficiència del treball.

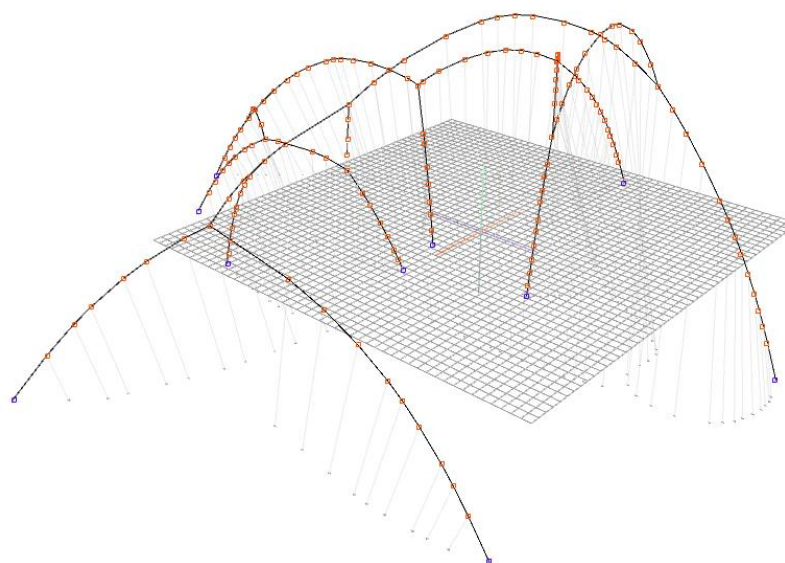


Fig 78. Fixem-nos en el cas mostrat a la figura, en la qual a partir d'un dibuix improvisat, en alliberar els punts i deixar-los penjar, s'ha obtingut una estructura de manera natural, l'usuari només ha de plantejar un esbós que pot comprovar a la pràctica en el mateix moment de fer-lo.

La capacitat de dissenyar amb aquest sistema consistirà més en ser capaç d'expressar les lleis que regeixen un model que no pas en generar formes en si mateixes. Donarem lloc a sistemes generatius més que no pas resultats i per tant un sistema es podrà adaptar a múltiples situacions diferents partint d'uns únics principis. Tot plegat és molt diferent del que fins ara fèiem.

4.3 Malles compostes de partícules i cables

De cara a la simulació de superfícies tèxtils, elàstiques o mínimes podem fer servir els mateixos objectes que hem fet servir fins ara (partícules i barres) però organitzades de manera diferent. Aquest plantejament de la malla ja ha estat emprat per altres programes^{167 168} amb resultats molt positius, però en alguns casos quedaven molt limitats a causa de que tenien un plantejament massa específic. En el treball realitzat per aquesta tesi aquest plantejament ha canviat i s'ha permès que tots els elements es puguin combinar entre ells de manera que en ser els sistemes

¹⁶⁷ Kilian, A., Ochsendorf, J., "Particle-spring systems for structural form finding", 2005, *Journal of the international association for shell and spatial structures* (J. IASS), Vol. 46 No. 2 August n. 148, P. 77-84

¹⁶⁸ <http://spacesymmetrystructure.wordpress.com/>

dinàmics una estratègia general del programa i no una aplicació particular qualsevol element es pot combinar amb la resta. Una altra diferencia significativa amb altres experiències anteriors és la facilitat amb la qual es poden plantejar malles amb diferents tipologia de cel·la, això ha permès superar l'estructura quadrada o la triangular i experimentar amb malles hexagonals, de configuració lliure, amb qualsevol tipus de contorn o simplement realitzades manualment com quan fem un dibuix en un programa de CAD. En conclusió qualsevol tipologia de malla formada de cables es pot simular. Cal tenir en compte que la varietat de tipologies de Cel·la donen lloc a resultats diferents a causa de les particularitats del procés d'estirament en el qual els elements es modifiquen seguint els estats tensionals. Com és lògic, segons el tipus de cel·la, les carregues es reparteixen de manera diferent i per tant les deformacions també variaran. Basant-me en aquest criteri hem classificat les malles estudiant les peculiaritats de cada tipologia de cel·la.

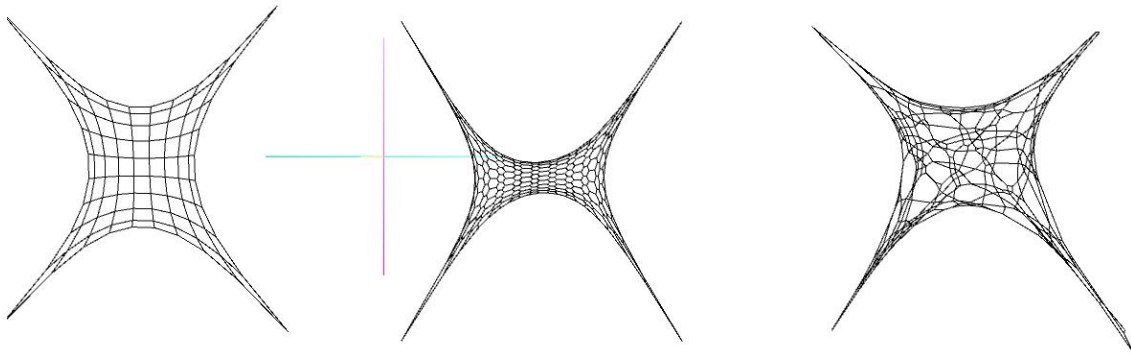


Fig 79. La següent figura nostra tres malles formades de cables i sotmeses a un procés de relaxació dinàmica, la primera disposa de cel·les quadrades, la segona de cel·les hexagonals i la tercera és una malla lliure, sense una estructura definida.

Val a dir que en treballar amb sistemes dinàmics es configura el conjunt de la malla i per tant els nostres dissenys sempre passaran pel filtre de l'equilibri tensional. Això pot entrar en conflicte amb els nostres plantejaments ja que el criteri de disseny dels arquitectes quasi sempre és basa en preceptes geomètrics mentre que el criteri dinàmic és un criteri basat en els estats de tensió i segons aquesta formulació les distàncies ja no depenen de criteris geomètrics sinó de la manera com les tensions es distribueixen per l'estructura fent que totes les barres treballin de la manera més uniforme possible. Com que no sempre ens interessa que això passi el programa disposa de mecanismes i opcions per bloquejar algunes de les seves parts i mantenir-les estàtiques mentre les altres es desplacen lliurement. Això ens permet generar mecanismes de control del model gràcies a que podem generar suports fixes per a les parts dinàmiques i modificant aquestes parts fixes tot el conjunt es deforma conseqüentment. Com els punts estàtics tenen una capacitat infinita per suportar les càrregues que els arriben es poden considerar com a suports que, això sí, permeten el gir.

Un altre aspecte important que cal tenir en compte a l'hora de plantejar malles per a finalitats constructives és quins avantatges i desavantatges poden tenir les diferents tipologies de cel·la a nivell constructiu. En aquest sentit cal remarcar la importància que té la capacitat de plantejar una estructura i avaluar-la a l'hora de dissenyar, perquè com veurem a continuació, hi ha sistemes que no es podem plantejar geomètricament de manera senzilla i que per tant tenen un ús molt restringit, encara que siguin perfectament construïbles, com seria el cas de les malles formades de panells quadrats o hexagonals de cares planes. A l'altre extrem trobem les malles triangulars que són una tipologia més fàcil de controlar geomètricament i que mantenen la planicitat per totes les seves cares de manera automàtica, però no són la millor opció a nivell constructiu perquè impliquen fer convergir més barres de les necessàries per cada vèrtex cosa que en malles de geometria quadrada o hexagonal es pot ajustar molt més estalviant material i simplificant el procés de construcció ¹⁶⁹. Així, doncs, es plantegen reptes de disseny que de solucionar-se es podrien materialitzar en nous tipus de construcció però que ara mateix no es pot realitzar perquè no hi ha manera d'assegurar la planicitat de les cares quan alterem la disposició dels vèrtex de la malla per editar-la. Actualment l'única sortida per aquest problema és fer servir superfícies de doble curvatura per tancar les cel·les o bé es fa servir algun tipus de sistema de panel·lització d'aplicabilitat limitada. Així, doncs, el programa pretén plantejar les malles de manera que es puguin restringir el moviment dels vèrtex a aquelles posicions que assegurassin la planicitat de totes les cares en temps real i d'aquesta manera el problema quedaria resolt. Però també cal tenir en compte que en el cas que tal mecanisme existís amb una fórmula directa i es pogués fer servir en temps real, ens trobaríem que la major part de vèrtex queden simplement impeditos per a moure's en cap direcció, i probablement no seria possible modificar la malla de manera substancial, tornant-la un element rígid que seria pràcticament inservible. Aquí és on els sistemes iteratius aporten la solució al problema en ser capaços d'assegurar una condició geomètrica (planicitat de les cares) en temps real però no de manera estricta permeten les modificacions dels usuaris. D'aquesta manera no impedim el moviment lliure dels vèrtex de cara a la modificació del model podem experimentar amb diferents propostes i un cop la forma ha quedat establerta el sistema va buscant la manera més òptima d'aplanar les cares.

En els exemples que exposo a continuació el mètode de treball es basarà sempre en el mateix esquema, una malla de nodes, de contorn quadrat, units per barres, plans i altres funcions dinàmiques segons sigui el cas. Aquestes malles poden ser de tres tipus, quadrades, hexagonals i irregulars. Aquests tres tipus de malla són fàcils de plantejar amb les eines de que disposa ja l'aplicació. Un cop feta la malla es bloquejaran una sèrie de punts que faran de suport del conjunt i llavors es farà entrar en carrega el sistema. Modificant les característiques mecàniques de les

169 Pottman, H., Asperl, A., Hofer, M., Kilian, A., *Architectural geometry* 2007, Bentley institute press P.671

barres, els plans o les funcions complementaries es controlarà la geometria de la malla i el tipus de resultat que volem obtenir. A continuació estudiarem les malles formades únicament per cables en les quals segons la configuració de les barres i de propietats de les cordes podrem generar tot un ventall de diferents possibilitats formals.

4.3.1 Malles de cordes rígides

En el treball sobre malles trobaríem el cas més senzill com la malla de X per Y vèrtexs en la qual no actua cap força externa. Aquesta estaria definida per cordes rígides (opció per defecte), o cordes que no canvien la seva longitud. Es tractaria d'un element amb un comportament molt similar al d'una peça de roba en la qual quan estirem alguns dels extrems es deforma. Si per un casual volem definir una figura de dimensions inferiors a les de la malla original llavors ens trobarem que aquesta es plega, s'arruga, com quan rebreguem un paper o ens posem una peça de roba massa gran. Aquesta tipologia és adequada per treballar amb objectes que volem que retenguin unes mesures concretes en tot el procés de modelatge però no ens servirà per trobar sistemàticament superfícies mínimes perquè no pot generar tensió interna ni adaptar-se als canvis de morfologia ja que no pot canviar les seves mesures. Treballar només amb aquesta configuració ens permet simular de manera adequada molt pocs casos, però variant algunes propietats es podrien dominar tota una col·lecció de casos nous que poden tenir aplicacions pràctiques i que no impliquen un major cost computacional ni complicarien el programa sinó que el farien molt més flexible. Un dels casos, molt estès, que es pot simular amb aquesta tipologia de malla és construir una quadricula qualsevol, fixar-ne una sèrie de punts que sostindran l'estructura i deixar-la "caure" en el alguna direcció per obtenir el que seria la inversa d'una volta. En el programa el que s'inverteix és la direcció de la força de manera que obtenim directament l'estructura que desitgem. Aquesta mena de casos s'exposen en la següent figura on podem veure diverses tipologies. Com podem veure a la següent figura, en treballar amb aquest mètode, els punts que bloquegem a la base de la malla seran fonamentals per definir el disseny posterior i la manera com treballarà.

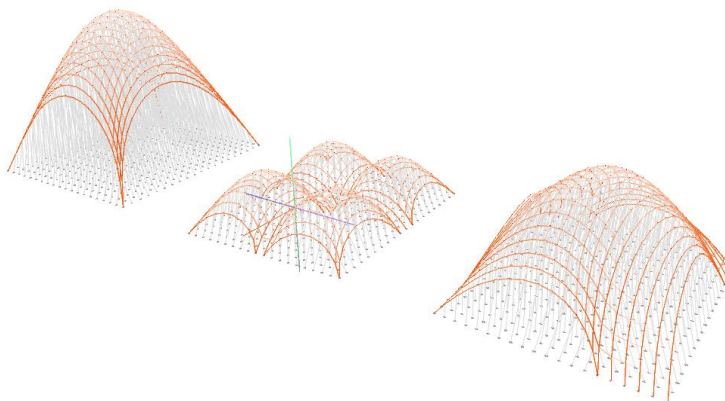


Fig 80. Diferents casos de malla generada amb cordes rígides en les quals segons la configuració dels punts que s'han bloquejat a la base de la malla s'han obtingut configuracions variades. Observis que la major intensitat de color corresponen les parts que més treballen de la malla.

Si ens fixem en els tons de color, que ens donen la intensitat de les tensions, veurem que les malles no carreguen uniformement en totes les direccions, quasi sempre hi ha un sentit preferent pel que es desvien les càrregues. Això pot ser fàcilment detectat en aquest estadi inicial per tenir en compte en futurs desenvolupaments del disseny segons el comportament estructural.

4.3.2 Malles amb cordes tènsils

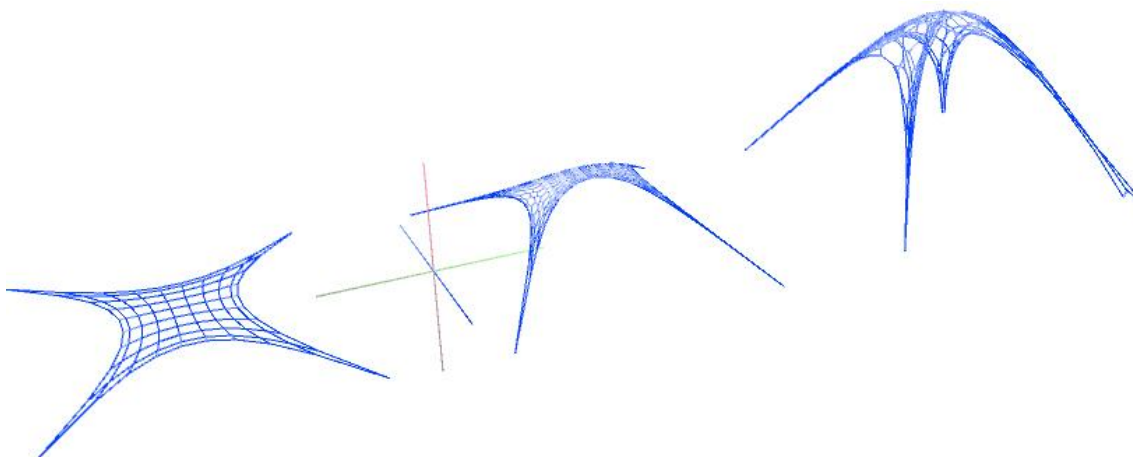


Fig 81. La següent figura ens mostra tres malles definides amb diferents tipus de cel·la. Es pot observar clarament que la malla quadrada és, en gran mesura, la més rígida.

Així, doncs, es planteja l'objectiu de construir una malla més versàtil i més capaç de simular certs casos que poden tenir lloc freqüentment en el món de l'arquitectura. Per fer això ha calgut afegir les propietats de comportament tènsils a les cordes que hem vist en descriure la funció de la barra i que un cop assignades fan que la malla es comporti de manera molt més flexible. Val a dir que les propietats de la malla es controlaran a partir de les seves cordes, per tant els valors de tensió interna, o d'elasticitat no seran propietats intrínseques de la malla sinó de les seves parts. No cal dir que això implica que una malla pot tenir diferents tensions per a cada corda i per tant obtenir malles amb comportaments molt concrets i complexos. Per assignar la propietat a les cordes que les fa elàstiques cal seleccionar les barres i obrir el panell de propietats, fet això cal activar l'opció "Adaptativa" de manera que tal com hem vist en el codi que controla les barres aquesta assignarà un percentatge de la longitud actual a la longitud base de la recta i generarà una tensió interna de retracció que també podrem graduar.

Un dels casos que podrem simular en assignar cordes elàstiques amb tensió interna és la superfície mínima, que ha estat treballada àmpliament en el camp de l'arquitectura especialment per a cobertes lleugeres tèxtils. Val a dir que amb aquesta aproximació es pot obtenir amb molta facilitat aquesta propietat. Com podem veure a les figures en general es tendeix a reduir

considerablement la superfície de treball a una mínima expressió obtenint múltiples propietats com per exemple un repartiment homogeni de les tensions per a totes les cordes. A més d'això, en ser un element adaptable, pot adaptar-se a proporcions o longituds diferents sense arrugar-se com en el cas de les malles formades de cordes rígides, de manera que és adaptable i per tant comporta certs avantatges en la fase de disseny en la qual els elements no estan definits i cal modificar contínuament el model. Tot i això no sempre desitgem que la malla adaptable es comporti d'aquesta manera i per aquesta raó, com veurem en el punt dedicat al disseny, tenim funcions que ens permeten alterar diferents factors dins el comportament elàstic.

Un aspecte poc intuïtiu d'aquesta propietat és que les estructures de barres elàstiques es deformen fins que arriben a un punt d'equilibri amb la tensió interna. De vegades aquest comportament pot resultar una mica estrany perquè veiem una estructura deformar-se molt sense trencar-se cosa que sobta. Tot i que es podria programar un punt de ruptura i simular un comportament quasi real a nivell estructural, no m'ha interessat fer-ho perquè treballant en una fase de disseny estic més interessat en la capacitat d'adaptació de les formes que no en el comportament físic real.

4.3.3 Malles de comportament tensional irregular

Fent servir les propietats de les barres és possible canviar la tensió interna de manera que podem formar el que seria una malla de comportament tensional irregular o anisòtrop. En aquest cas les deformacions dependran de la resistència de cada zona de la malla, de manera que la forma s'adaptaria segons la distribució de les càrregues. El més interessant d'aquestes malles és que donen lloc a dissenys irregulars partint de models que són perfectament regulars fent servir només la modificació de la resistència de les cordes i per tant directament variant la distribució de càrregues segons la resistència. Això posa de manifesta la relació que hi ha entre la tensió i la geometria en aquesta aproximació als problemes de geometria.

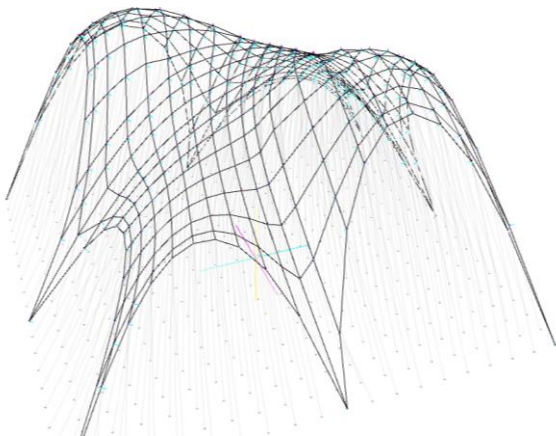


Fig 82. A la figura es mostra una malla regular amb diferents resistències assignades a les cordes. Com podem veure la forma varia considerablement en variar la tensió a les cordes de la malla.

Aquest tipus de modificació pot tenir lloc tant en malles formades de cordes rígides com per cordes elàstiques o flexibles. En el primer cas només caldria que variem la intensitat de la força de la barra de manera que en tenir barres que mantenen amb més vigor la seva longitud original que d'altres les càrregues variïn la seva distribució de manera que el punt d'equilibri de la malla es desplaci. En el segon també podríem variar la intensitat de la força però a més podríem variar el valor de tensió interna, fent això últim l'efecte seria similar al del cas anterior amb la única excepció que la força dependrà de la longitud de la recta, com més llarga sigui la recta més fortament retraurà per tant el comportament serà lleugerament diferent.

4.3.4 Cel·la quadrada

Avui dia hi ha molts casos d'ús de les malles en quadricula, per exemple en sistemes de CAD es fa servir en la representació de terrenys o de superfícies complexes, també en programació tova com Grasshopper són una estructura bàsica i en programes de panel·lització ^{170 171} s'acostuma a partir de la malla quadrada com a base de treball. Aquesta presència repetida de la malla quadrada en el món del CAD i la programació neix del fet que aquesta estructura és la traducció directa de la matriu. Això troba un equivalent geomètric en la quadricula de punts, que traduïda a un sistema de "mass-spring" dóna lloc a la malla quadriculada. És, doncs, un model arquetípic que té moltes possibilitats en computació. Un exemple molt clar d'aquesta capacitat de combinació el trobem en les superfícies NURBS que necessiten una quadricula de control per definir-se de manera que podem connectar fàcilment les malles quadrades a la malla de control de les NURBS, fent-les servir com a polígon de control d'aquestes. Tal com passava en el cas de les cordes es pot seguir un procés en el qual una superfície NURBS passi pels vèrtexs de control sent el resultat una superfície continua que imita la malla. Si la malla es deixa penjar formant una volta funicular la NURBS imita quasi a la perfecció una volta de catenària exacta sense necessitat de calcular malles de molts punts per tenir precisió. En aquest cas també ens resulta molt útil fer servir la malla quadriculada com a malla de control ja que el control manual de les NURBS és poc intuïtiu i per tant requereix d'algun sistema automàtic que en faciliti la modificació.

¹⁷⁰ Evolute tools, 2012, <http://www.evolute.at/software/evolutetools-for-rhino.html>

¹⁷¹ McNeel, Rhino Labs: PanelingTools for V4, 2012, <http://download.rhino3d.com/Rhino/4.0/PanelingTools/>

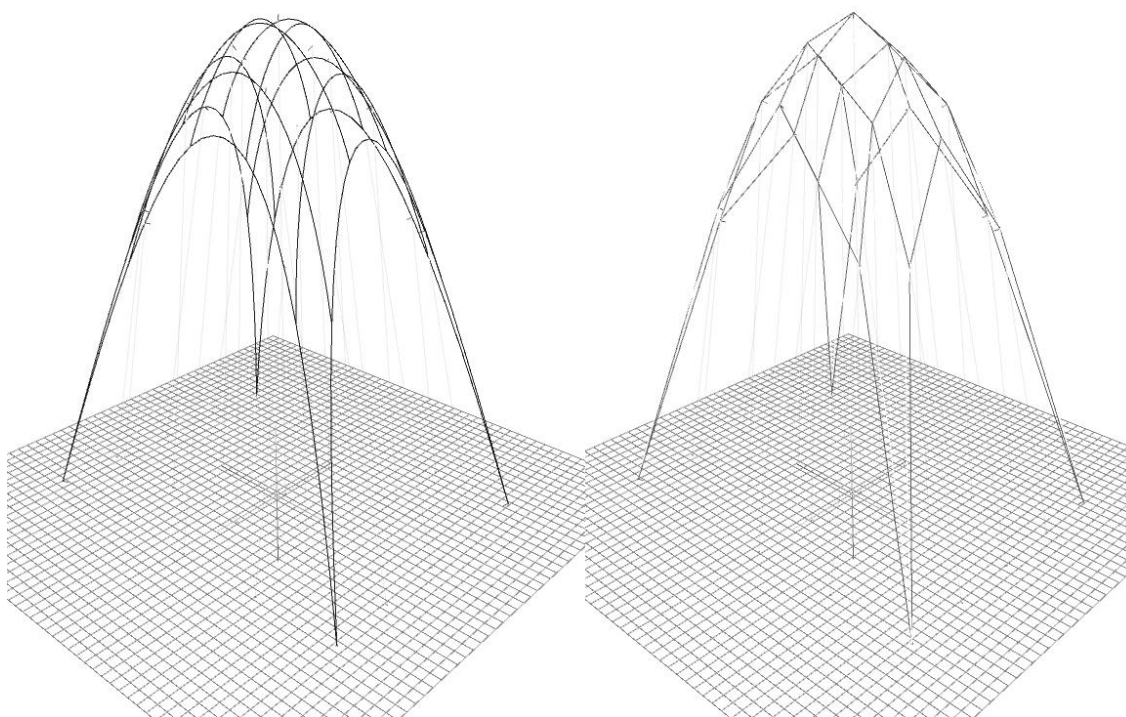


Fig 83. Tal com podem veure a la figura a partir d'un sistema molt esquemàtic, hem pogut reproduir com seria la superfície tènsil amb tota precisió, tot adaptant la NURBS als punts de la malla.

La cel·la de tipologia quadrada és, després de la triangular, una de les tipologies que dona més resistència a una malla, aquest fet es posa de relleu si la comparem amb altres tipologies com la de malla hexagonal o lliure que pateixen molta més deformació per a una mateixa càrrega. Aquest fet seria conseqüència de fer convergir un major nombre de barres per a cada node cosa que fa que aquests quedin molt més lligats a l'estructura i per tant tot el model acaba sent més rígid. Segurament una malla formada de triangles seria encara més rígida, perquè el nombre de barres per vèrtex seria encara més gran. En el cas de fer servir cordes rígides cal tenir en compte que si les malles no són perfectament simètriques en tots els sentits és molt probable que acabin treballant més en un sentit que en un altre. Aquest fet es deu a que la malla quadriculada té dues direccions principals i la de recorregut més curt és la que generalment s'emporta més percentatge de càrrega. Un exemple molt senzill el trobaríem si féssim una volta de canó que òbviament carregarà més en el sentit transversal que longitudinal. En aquest cas el sentit transversal és més curt que el longitudinal i per tant carrega més. Una altra característica d'aquest tipus de malla és que la cel·la quadrada té una capacitat limitada de canviar la forma i obtenir diferents tipus de panell de manera que a diferència de la malla hexagonal que veurem més endavant aquí el joc formal amb el panell és limita a diferents varietats de quadrilàters romboïdals i rectangulars.

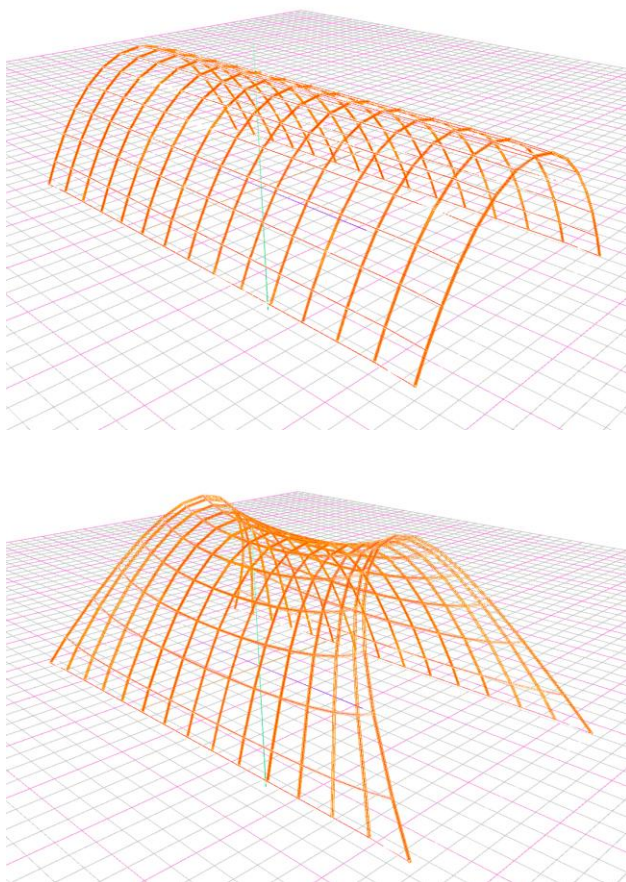
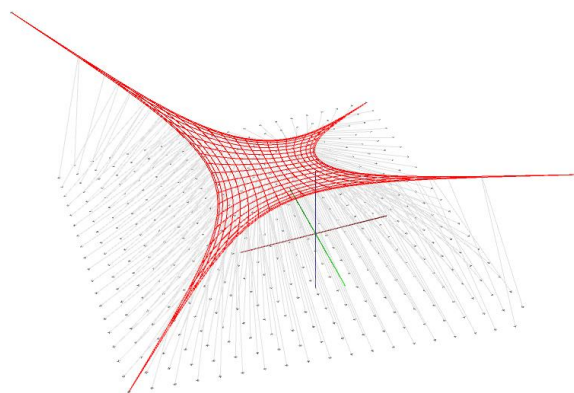


Fig 84. A la figura de la part inferior dreta podem veure una malla de cel·la quadrada formada per cordes elàstiques. tal com veiem ha format automàticament una superfície mínima. A la part superior esquerra veiem una vota de canó formada per barres rígides en la qual els arcs transversals són clarament la part que més treballa. A la part inferior esquerra s'ha aplicat un sistema de barres elàstiques que han repartit les càrregues de forma més homogènia modificant la forma perquè la càrrega es reparteixi per l'estructura fent que tots els elements treballin.



En cas de fer-se servir cordes de tipus elàstic obtindríem malles que formarien superfícies mínimes. En aquest cas podríem generar fàcilment estructures tènsils amb les quals simular lones o malles que cobreixin una superfície determinada. Val a dir que en aquests casos el sistema carrega de manera homogènia ja que els sistemes de barres elàstiques distribueixen les càrregues de manera uniforme, així, doncs, encara que la forma no sigui perfectament simètrica les barres es retrauran per tal de que les càrregues es reparteixin de forma equitativa.

4.3.5 Cel·la hexagonal

A diferència del que passava amb la malla quadrada la malla hexagonal és molt més difícil de definir ja que no segueix una quadricula simètrica sinó que necessita una disposició molt concreta dels vèrtexs per poder-se generar. Això implica que el procés de generació i de disseny amb aquest sistema sigui més complicat que en el cas anterior però ofereix alguns avantatges que han fet que hi hagi un interès creixent en aquesta mena de sistemes. Resulta que una de les seves propietats és que només fa convergir tres nodes a cada vèrtex, de manera que a nivell

constructiu simplifica l'estructura i estalvia peces necessàries per a cobrir una mateixa superfície. Això fa que econòmicament parlant sigui una estructura molt més eficient que la quadrada o la triangular. Però no només hi ha raons econòmiques per fixar-nos en aquesta mena de malla. Un fet significatiu és que aquesta estructura la trobem amb molta abundància a la natura, ja es tracti dels ruscós d'abelles, o de les aglomeracions de bombolles, la configuració de malla hexagonal apareix reiteradament en el món natural i cal preguntar quina és la propietat/s que fa que això sigui així. Fixem-nos en la següent simulació en la qual s'ha creat una aglomeració de partícules, que tenen un radi determinat, i que es veuen atretes per línies de força, representades com a línies en el dibuix.

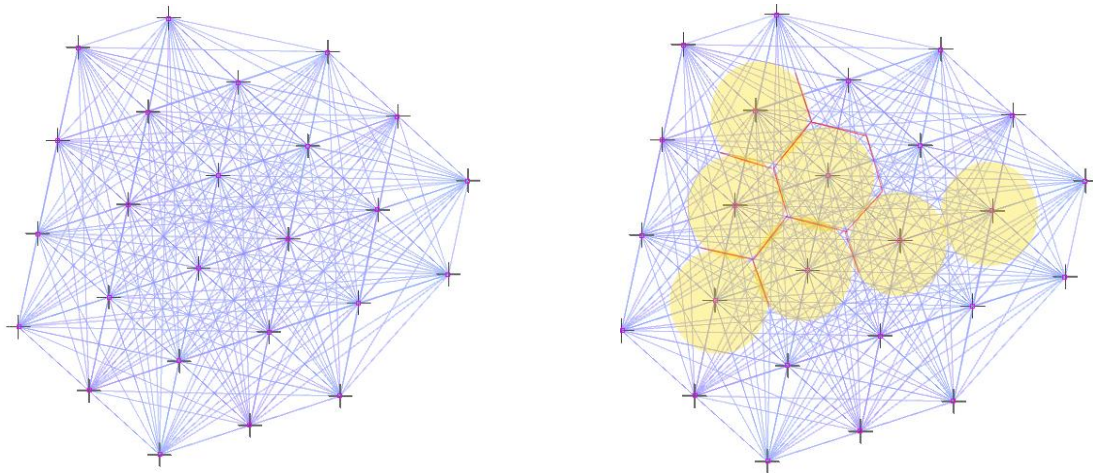


Fig 85. Tal com podem veure s'han connectat una sèrie de partícules a partir de línies de força o línies d'atracció. Cada partícula atrau a totes les demés i per tant totes mantenen una connexió amb tota la resta. Els punts tenen una distància mínima a partir de la qual reboten i no es poden ajuntar més de manera que naturalment es forma una estructura.

Si ens fixem en la figura veurem que l'estructura de les línies de força va dibuixant triangles en tota la formació, tenint en compte que cada punt té un radi mínim començarem a comprendre que en realitat ens trobem d'avant d'un cas de malla hexagonal, on cada vèrtex correspondria al centroid d'un hexàgon i les línies de força que es reparteixen per la malla es corresponen a les possibles vies per les quals corran les forces dins la malla. El fet que es generin naturalment estructures equivalents a la malla hexagonal també és a causa de que les partícules, en aquestes condicions de simulació, tendeixen a intercalar-se entre elles, omplint el màxim d'espai possible amb el mínim nombre d'elements. Per tant les malles hexagonals no són una decisió arbitrària si-nó que són estructures que emergeixen de la recol·locació espontània de les partícules i el repartiment natural de les càrregues omplint el mínim espai amb les màximes cel·les possible i per tant amb el mínim material.

Altres propietats d'aquesta mena de malla passen per ser més flexible que les malles quadrades de manera que es poden adaptar a situacions més difícils. En general aquesta propietat no es

posa de relleu quan treballem amb estructures de cables ja que en aquest cas es comprova sobretot la capacitat resistent de l'estructura de barres. Però si treballem amb estructures de plans, veurem que la flexibilitat d'aquests sistemes baixa considerablement ja que s'afegeix una condició molt més restrictiva al moviment general. En aquestes condicions totes les malles tendeixen a la aplanar-se com veurem més endavant, però segons l'estructura del panell aquesta tendència és més o menys accentuada. És en aquest aspecte on la malla hexagonal mostra alguns avantatges sobre la quadrada. En certa manera aquest avantatge neix del fet que la cel·la hexagonal és molt més adaptable que la quadrada perquè es pot deformar més per donar lloc a diferents tipus de textura.

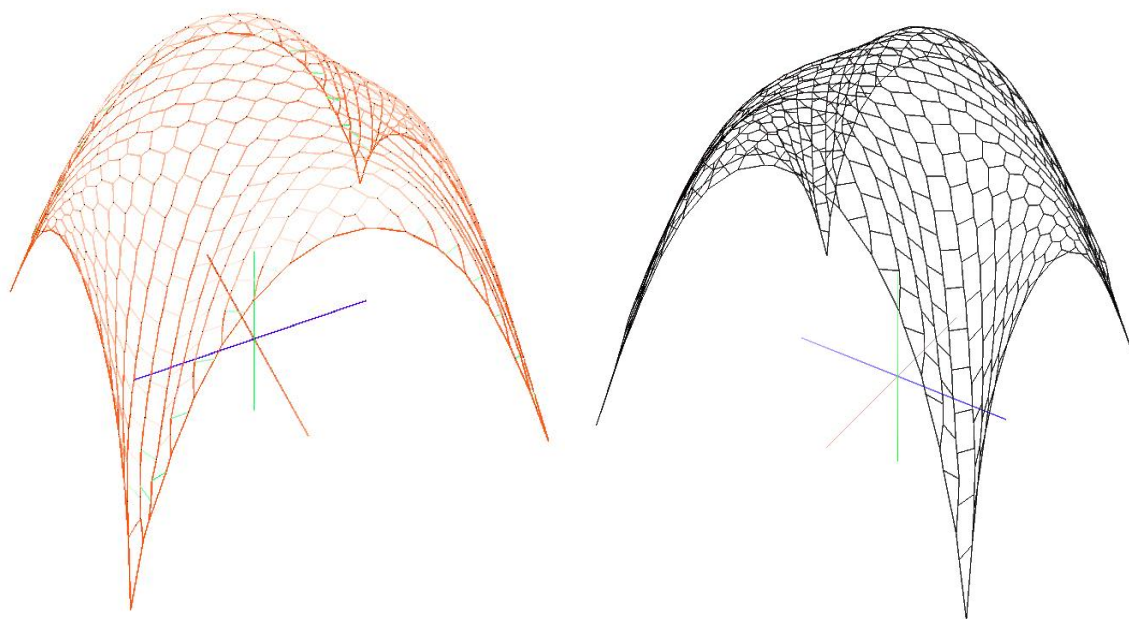


Fig 86. La figura ens mostra una malla purament de barres de cel·la hexagonal. Com es pot observar la configuració de la cel·la canvia en gran mesura segons la tensió.

A la figura es pot veure com la malla hexagonal, en estirar-se, pot generar dos tipus de configuració. Una primera que és la purament hexagonal, i una segona on es genera una estructura més similar a una malla quadrada intercalada. El per què d'aquesta configuració de quadrilàters intercalats la trobem en el mapa de tensions que tenim just al costat. Quan la tensió de la malla és més important en un sentit que en un altre, les cel·les hexagonals tendeixen a formar quadrilàters, això mateix és el que podem observar en el mapa de tensions on veiem que les zones amb configuració de quadrats intercalats coincideix amb zones on les tensions es remarquen més en un sentit que en l'altre. Per tant la forma de la malla canvia per adaptar-se a l'estat de tensions, cosa que en la malla quadrada no passava.

Un altre aspecte interessant és observar que passa quan a la malla hexagonal es configuren les cordes com sistemes elàstics amb tensió interna. Quan fem això la configuració interna canvia completament, desapareixen les cel·les de tipus quadrat i tot queda reduït a hexàgons molt regulars de diferents mesures. Per altra banda la malla en general agafa una forma que no és simètrica en tots els sentits i per tant mostra una certa anisotropia en el comportament general.

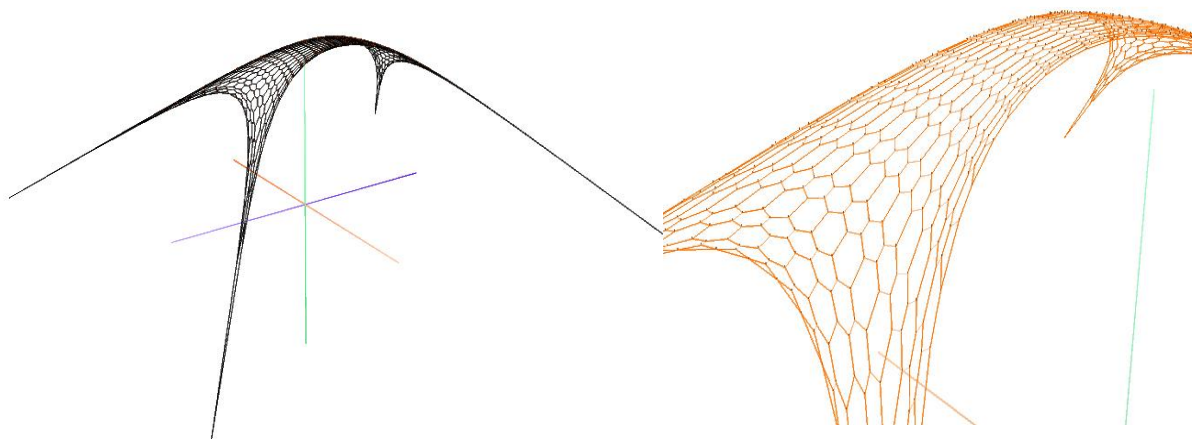


Fig 87. En el cas de les malles hexagonals formades per cordes elàstiques i auto tensades observem canvis externs i interns que es mostren en les dures figures. A l'esquerra podem veure com l'estructura general deixa de ser simètrica en totes les direccions, obrint-se més en un sentit que en un altre. A la dreta veiem un detall de l'estructura interna on es pot veure clarament com els hexàgons no perden la seva morfologia, encara sí que es deformen.

Per entendre aquestes casuístiques hem de recordar les propietats que tenien les malles formades per cordes elàstiques, en aquells casos els sistemes tendien a produir superfícies mínimes i a repartir les tensions de manera uniforme. Bé, una de les propietats que tenien les malles hexagonals era canviar la tipologia de cel·la segons la direcció dominant de la tensió en una zona concreta de la malla, però en fer servir cordes elàstiques que reparteixen la tensió de manera uniforme no es donen casos on les tensions siguin significativament més intenses en un sentit que en un altre, per això quan les carregues són uniformes desapareixen totes les tipologies de quadrats intercalats. Per altra banda el conjunt de la malla hexagonal no treballa de manera uniforme sinó que reparteix les carregues en tres possibles direccions dominants. Segons la manera com es reparteixen les càrregues tenim direccions més favorables en les quals resisteix més, i altres més desfavorables on es resisteix molt menys. En el cas de les direccions preferents veiem que no són simètriques respecte als eixos cardinals, cosa que sí que passava amb les malles quadrades. A causa d'això, quan generem una malla d'hexàgons en un contorn quadrat, o sigui un contorn que és simètric respecte a dos eixos, el resultat mostra una certa anisotropia, ja que el comportament de la cel·la no és coherent amb la forma del contorn.

Així, doncs, la malla hexagonal presenta tres eixos de simetria¹⁷² en els quals la malla es deformarà i donarà lloc a diferents tipus de cel·la amb molta més riquesa que la malla quadrada però ho farà en un contorn que entra en contradicció amb el seu funcionament bàsic (contorn quadrat).

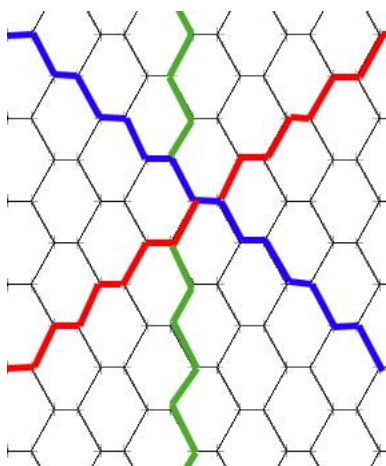


Fig 88. Si ens fixem en la imatge veurem com les càrregues en una malla hexagonal tendeixen a anar en tres direccions principals i no dues, com en la malla quadrada de manera que el comportament no és simètric respecte a un eix vertical o horitzontal.

4.3.6 Cel·les heterogènies

Quan es crea una combinació aleatòria de cables que s'intersequen entre ells s'aconsegueix un entrellaçat caòtic al qual podríem anomenar malla irregular. Les tipologies de cel·la que en resulten no són ni molt menys uniformes sinó que varien entre pentàgons, hexàgons, quadrats, triangles o qualsevol altra morfologia. A causa d'això tenen un comportament diferent al que havíem observat fins ara ja que no reparteixen les seves tensions de manera regular sinó que les càrregues van recorrent el mallat seguint camins aleatoris i deixant moltes barres amb cap o molt poca càrrega, mentre d'altres queden considerablement sobrecarregades. Aquest fenomen no és desitjable ja que o bé harem d'eliminar les barres sobrants a mà, o bé harem de canviar la resistència de les barres per aconseguir un comportament més uniforme. Aquesta mena de problemes de seguida els podrem detectar si mirem un mapa de tensions en què algunes barres estaran poc o gens representades i d'altres destacaran considerablement. A més, podem observar com les tensions tenen tendència a seguir una estructura en forma d'arbre que es ramifica pel conjunt, deixant entreveure que l'estructura idònia per aquests casos seria precisament una estructura ramificada. Veurem també la presència de forats i altres fenòmens

¹⁷² Wang, W., Liu, Y., "A note on planar hexagonal meshes", 2010, *The IMA Volumes in Mathematics and its Applications* Volume 151, 2010, pp 221-233

que amb malles regulars no ens havíem trobat ja que hi haurà zones poc o gens poblades mentre altres quedaran extremadament saturades de barres.

Totes aquestes anomalies es deuen a un conjunt de factors; Per una banda el fet que les barres tenen longituds diferents entre elles, i per tant tenen diferents resistències provoca que les les càrregues acaben seguint amb preferència camins formats per barres el més petites possible perquè són més rígides i perquè les barres petites acostumen a estar millor connectades amb el conjunt en tenir més connexions per a un mateix recorregut i això permet distribuir-se millor per tota l'estructura. Però hi ha un factor encara més important per entendre com es reparteixen les càrregues en aquesta mena de geometries. En el procés de repartiment de les tensions cal recordar que la tendència general és anar pels camins més rígids, i en tractar-se d'un element irregular és poc probable que aguantin igual en tots els sentits. A causa d'això fàcilment poden formar-se arcs a dins l'estructura que van en el sentit de major resistència deixant l'altre sentit sense cap càrrega o amb càrregues purament residuals. Això també ho hem observat en el cas de les malles hexagonals on es perdia la geometria dels hexàgons quan passava aquest fenomen perquè s'estiraven més en un sentit que en un altre, allà però el resultat era més regular i donava lloc a una malla de quadrats intercalats mentre que aquí es formen rams d'arcs catenàris que s'intersequen entre ells.

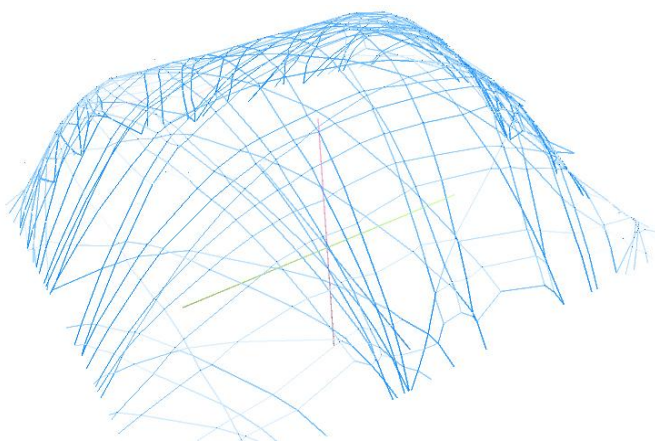


Fig 89. Mapa de tensions d'una malla irregular en el qual podem observar com les tensions es reparteixen des de la base seguint una estructura d'arbre. Si ens fixem atentament en com es reparteixen les càrregues per la malla observarem que van seguint línies que acaben formant arcs funiculars.

És curiós fer notar que per molta densitat de barres que donem a una malla irregular, difícilment aconseguirem que aquesta es comporti de manera homogènia en tots dos sentits. És quasi inevitable que un dels sentits mostri una major resistència que l'altre i per tant acabarà fent que la malla treballi més en aquell sentit, deixant a la resta resistint càrregues purament residuals. Altres fenòmens que tenen lloc en aquesta mena de casos són l'obertura de forats que es deuen al repartiment no uniforme de les barres que deixa algunes zones sense cap ocupació. En quedar buit apareix un forat que s'adapta a les càrregues que té al seu entorn i que acostuma a prendre una geometria arrodonada.

Un exercici interessant que es pot aplicar a les malles irregulars és eliminar les barres que no superen un cert valor de tensió. Com que fer-ho a mà es innecessàriament lent i tediós, hem desenvolupat una funció molt senzilla que dins el mateix programa avalua i elimina totes les barres que no superen un cert llindar de tensió. No és un procés tant lineal com un esperaria ja que cada cop que eliminem barres, encara que aquestes treballin poc, les càrregues es tornen a repartir de manera diferent. En repetir el procés molts cops un acaba obtenint una estructura molt optimitzada on totes les barres treballen i que acostuma a reproduir estructures d'arcs funiculars combinats entre ells.

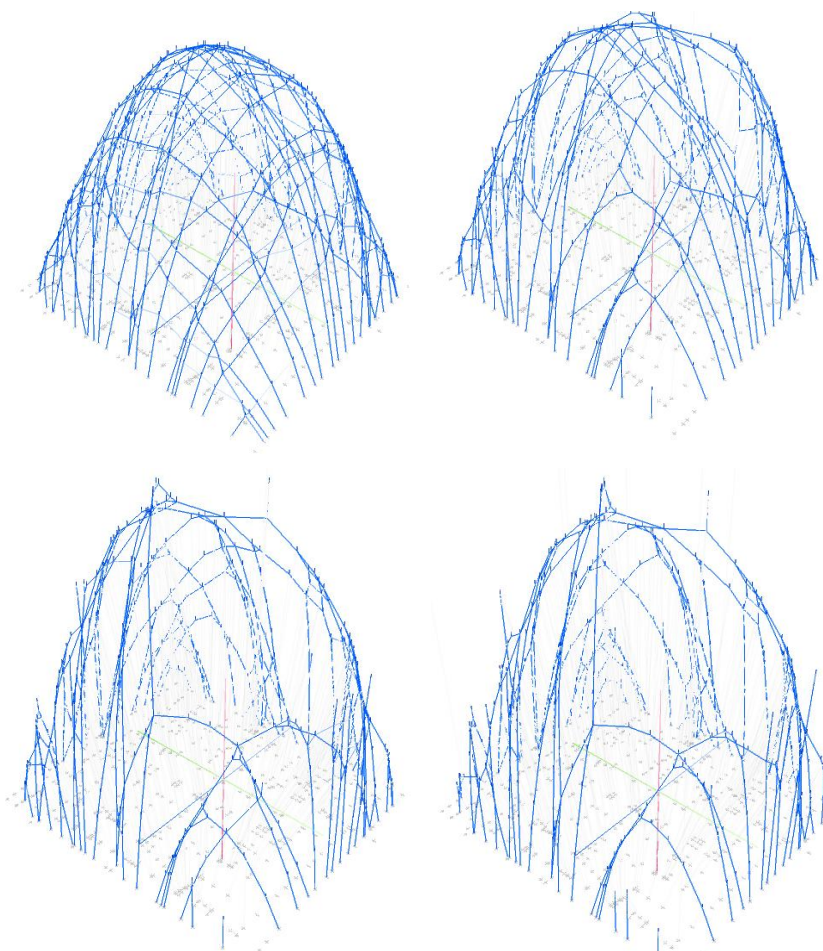


Fig 90. Evolució d'una malla irregular a través d'un procés d'optimització en el qual s'han anat eliminant les rectes que no treballen.

Tots aquests casos han tingut lloc amb cordes rígides de longitud fixa que només es podien adaptar a unes condicions concretes. Però les cordes poden tenir moltes propietats i cal experimentar com es comporten aquests tipus de malles quan els hi apliquem cordes de tipus flexible. Per començar a treballar aquest tema recordem el que passa amb les malles hexagonals on les tensions no actuen igual en tots els punts i per tant les cel·les pateixen deformacions importants en la seva geometria. Aquest fenomen desapareixia en introduir cordes flexibles amb tensió interna que repartien les càrregues de manera homogènia, a causa d'això recuperàvem la geometria original hexagonal dels panells. Nosaltres, en treballar amb malles caòtiques no hem

partit d'una geometria regular de panells quan hem plantejat la nostra geometria de base però si apliquem aquesta metodologia té lloc un fenomen de regularització basat en una distribució equilibrada de les tensions. Si bé en el cas de la malla hexagonal es produïen hexàgons, en el nostre cas el que obtenim són polígons més o menys regulars que corresponen a les geometries reals que hem dibuixat sense advertir-ho. Quan una malla es tensa, la geometria d'un panell depèn únicament del nombre de costats que tingui, no importa la configuració inicial d'aquest.

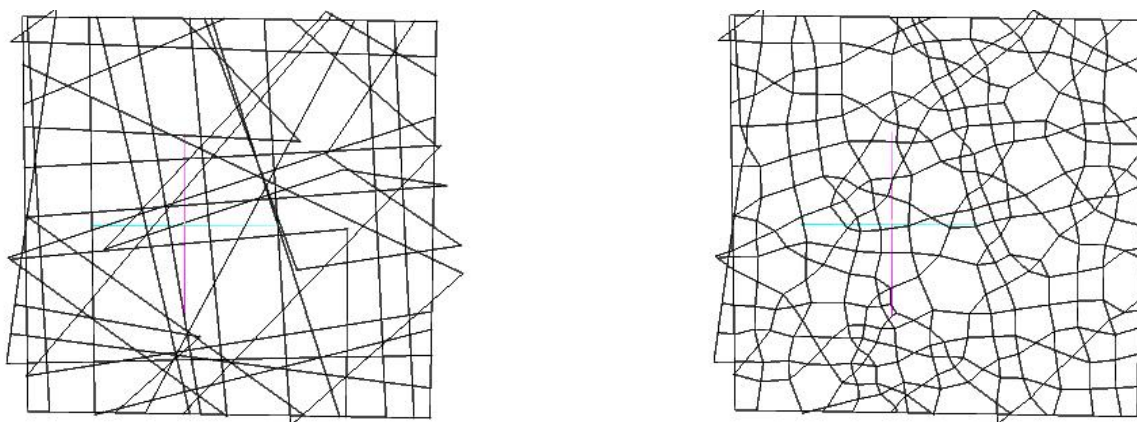


Fig 91. Malla irregular tractada amb cordes flexibles amb tensió interna, a l'esquerra tenim l'estat inicial, a la dreta tenim el resultat després d'aplicar una tensió a les cordes.

El que obtenim en aquests casos és una teranyina de pentàgons, hexàgons, triangles i quadrats connectats entre ells per les seves cares, més endavant podrem transformar cadascuna d'aquestes cel·les en panells i observar com es comporten davant de les deformacions. Per tant partint d'una figura completament irregular, podem obtenir una versió "equilibrada" de la mateixa que s'adapti a un repartiment de càrregues uniforme. Cal entendre que el criteri d'optimització és basa sempre en la uniformitat del comportament tensional, per això si som capaços de traduir en forma de tensions les propietats geomètriques que volem obtenir, segurament veurem com aquestes es conformen davant nostre en temps real. Torno, doncs, a insistir en la importància de ser capaços d'entendre la forma com una tensió dins el model, de manera que tots els problemes geomètrics quedin solucionats per aquesta via.

En fer entrar aquest sistema en càrrega, obtenim una distribució de tensions similar a les que ja havíem observat en malles regulars, on les zones perifèriques s'emportaven una major tensió que les zones centrals. Però malgrat tot en general el comportament és molt més uniforme i a diferència del que passava en el cas de les cordes rígides, aquí no hi han barres que quedin sense càrrega o sobrecarregades ja que tots els elements treballen de manera més homogènia. Si repetim l'exercici d'eliminar automàticament les barres que no treballen, obtenim el resultat que no cal eliminar cap barra així queda demostrat que efectivament les càrregues queden més

repartides. Però les irregularitats de la malla troben una manera diferent de manifestar-se i aquest cop ho faran a nivell formal on veurem deformacions molt similars a les que observàvem en generar malles que tenien diferents resistències assignades a les seves barres. En generar un polígon de moltes cares aquest tendeix a formar un forat més gran que un que en tingui poques, això produeix canvis en el comportament de malla que es deriven de les tipologies de cel·la que hagin quedat a una certa zona.

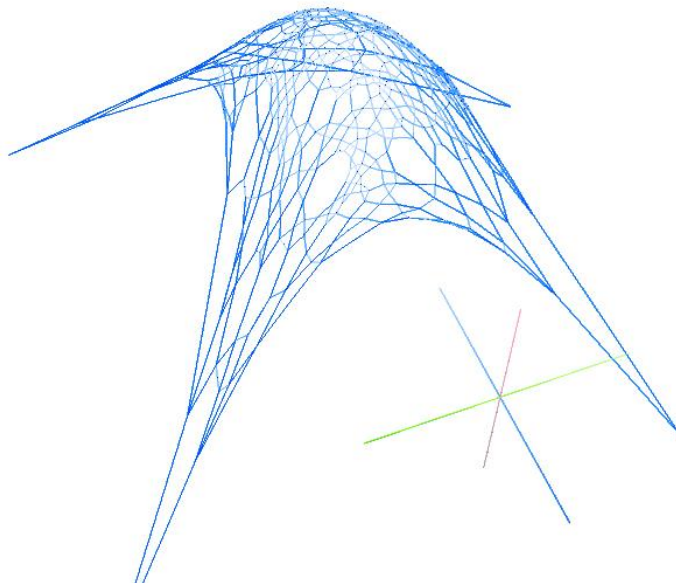


Fig 92. Mapa de tensions d'una malla irregular formada de cordes elàstiques amb tensió interna. Com es pot veure a la figura, les tensions es reparteixen en forma d'arbre. Es pot observar una major tensió a les vores i una menor intensitat a les parts centrals.

També es pot observar com el repartiment de les càrregues pren una forma d'arbre molt més accentuada que en els casos anteriors. Ara es pot veure com la tensió es ramifica a partir dels punts de suport, i es pot observar molt clarament com va perdent intensitat a mesura que ascendim a les parts més altes de la figura. De la mateixa manera un arbre és més gruixut a la seva base i a mesura que es va ramificant va perdent gruix i va guanyant esveltesa. Aquest comportament, doncs, reproduïx un sistema natural de suport.

4.4 Malles amb sistemes de panells

L'ús dels panells plans és fonamental a l'hora de plantejar models de malla constructivament viables perquè és un element que permet aproximar la forma dels objectes complexos a partir de peces. Actualment hi ha molt interès en transformar una superfície qualsevol, com per exemple una NURBS, en un conjunt de peces prefabricades i és una de les àrees en la qual més s'està

investigant actualment ¹⁷³. L'objectiu del programa en aquest sentit és acostar els processos de fabricació i els procés de modelatge de manera que el model resultant compleixi una sèrie de premisses que el facin viable. Així, doncs, la panel·lització és una de les estratègies que permet transformar elements no construïbles (o construïbles a un cost excessiu) en elements més fàcils de construir i econòmicament viables.

Ja hem vist que quan es definia la funció de planicitat, les opcions que es donaven eren molt nombroses; Ara però investigaré les possibilitats geomètriques que té aquest mecanisme i com afecta el tipus de panell a la morfologia general del resultat. La funció de planicitat ens permetia mantenir una sèrie de punts sobre el mateix pla a partir de la generació d'un camp de força. En general els panells acostumen a anar muntats sobre una malla de suport. En fer això el comportament de la malla variarà considerablement de cara a integrar la condició de planicitat de les seves cel·les a les deformacions generals.

En aquest sentit la geometria de la malla i la tipologia de cel·la jugaran un paper central en el comportament del conjunt quan el carreguem. Aquesta mena de variacions geomètriques acostumen a alterar la manera com les tensions es reparteixen per l'estructura i per tant afectaran a la morfologia final del model que és fruit de l'estat d'equilibri de les tensions. Aquest comportament es combina a gran escala per donar lloc a tendències generals que no només afecten als panells, sinó a la forma general del model.

Aquests processos poden ser discrets a nivell visual, però són fonamentals a nivell constructiu ja que fan extensiva una propietat a tot el model en un procés de transformació que en uns segons ens genera una proposta optimitzada. Aquest prototip anirà madurant lentament de manera imperceptible, però al cap d'uns minuts veurem canvis molt significatius i molt més precisos de cara a donar una solució viable. Si bé el procés no sempre dona un model plenament construïble, perquè algunes parts presenten "errors" o superposicions inconvenients, en general la globalitat del model acostuma a ser vàlid, o si més no, ens indica una estratègia volumètrica que ens permetria realitzar aquella forma de manera eficient. Això és molt important, doncs, el programa no només serveix en generar elements construïbles, també ens pot ser igualment útil per donar idees de disseny o oferir possibles solucions a problemes geomètrics que després cal desenvolupar amb més detall.

Quan treballem amb malles de panells també cal tenir en compte les condicions de contorn ja que afecten a la manera com es comporta la malla en ser la constricció més important a la qual es veu sotmesa. Així, doncs, com que quasi sempre estic treballant amb malles de contorn quadrat, per qüestions de facilitat de control, els resultats acostumen a moure's al voltant d'aquest cas. Això no vol dir que no es puguin treballar altres tipus de vora i de fet el programa és capaç de plantejar qualsevol tipus de contorn per malles quadrades. Tot i que aquest sistema

173 Pottman, H., Asperl, A., Hofer, M., Kilian, A., *Architectural geometry* 2007, Bentley institute press **P.671**

pot admetre qualsevol mena de malla, necessitem eines de modelatge que ens ajudin a dibuixar aquestes malles sense haver de fer-ho barra a barra. A causa d'aquesta mancança hi ha tipologies de malla que no es poden dibuixar de manera eficient. El punt més conflictiu el trobarem generalment als panells extrems que estan a la vora, que han d'adaptar-se a dues geometries que poden ser contradictòries entre elles com seria el cas de panells hexagonals amb contorns de malla quadrats.

4.4.1 Panells sobre malles quadrades

El cas de la malla quadrada és el cas més bàsic de malla que presenta el dilema de la panel·lització. En general en ser una estructura amb propietats que la fan molt versàtil i senzilla permet fer models extensos amb els quals comprovar fenòmens a gran escala cosa que l'ha convertit en una de les estructures més treballades en computació en tota mena d'àmbits diferents. Aquest fet ha donat lloc a que es desenvolupin diverses estratègies per fer construïbles formes de curvatura complexa a partir de panells quadrats. Aquestes estratègies es basen en diferents mecanismes que intenten obtenir la planicitat de les cares normalment amb sistemes geomètrics que busquen aquesta propietat a partir de processos costosos de computació ^{174 175}. La necessitat de desenvolupar aquestes estratègies neix del fet que hi ha molts elements constructius que presenten una tipologia formal quadrada i plana, com per exemple els panells solars, molts aplacats en sistemes de façana ventilada, façanes vidriades, finestres i portes, paviments, voladissos, prefabricats, etc. En dissenyar amb aquesta mena d'elements ens interessa mantenir tant la geometria general del contorn com la planicitat de les seves cares per no generar més endavant problemes constructius.

En el programa de simulació dinàmica per assegurar aquesta propietat ens cal assignar un pla a cada cel·la fent que els seus vèrtex estiguin sobre el mateix pla encara que la malla deformi lliurement a l'espai. De la unificació d'aquests dos elements (malla quadrada + panell quadrat) neix un nou objecte que tindrà un comportament combinat entre el que seria un panell pla i una malla quadrada de tal manera que les propietats de tots dos elements es combinaran en una nova forma de comportament més complex. Val a dir que aquest aspecte dels sistemes dinàmics és central, en el sentit de que es pot combinar el comportament dels diferents elements per obtenir un comportament combinat que reté les propietats de tots dos. El conjunt es comporta de manera més lenta però permet proposar solucions a problemes geomètrics d'extrema complexitat a partir de sistemes iteratius. Com veurem més endavant això ha permès obtenir

¹⁷⁴ Evolute tools, 2012, <http://www.evolute.at/software/evolutetools-for-rhino.html>

¹⁷⁵ McNeel, Rhino Labs: PanelingTools for V4, 2012, <http://download.rhino3d.com/Rhino/4.0/PanelingTools/>

resultats de gran interès geomètric que fan constructives formes que fins ara oferien reptes molt difícils de superar i permet augmentar l'espectre de formes amb que treballa normalment l'arquitecte.

Aquest mecanisme per obtenir la planicitat de les cares no és l'únic que podem emprar amb sistemes dinàmics, doncs, hi han altres mètodes que poden semblar més senzills però que presenten certs inconvenients. Per exemple quan treballem amb sistemes de barres, podem plantejar una estratègia molt senzilla, que consumeix pocs recursos, per mantenir la planicitat dels panells. A partir de la generació de barres creuades que tornin els quadrilàters en estructures rígides podem forçar la planicitat d'una cara quan es veu sotmesa a accions que intenten deformar-la. Encara que a primer cop d'ull sembla una sortida molt adient, ràpidament veurem que té limitacions greus. En primer lloc és un mecanisme que no és genèric sinó que funciona exclusivament pel cas de panells quadrats, cosa que és un inconvenient de cara a treballar amb tipologies lliures que puguin englobar casos generals. En segon lloc aquest mecanisme en fixar la longitud de les diagonals obliga a fixar la geometria del contorn i no permet generar plans adaptatius que modifiquin en temps real el seu contorn i la seva superfície per adaptar-se a unes condicions determinades, únicament podrem treballar amb quadrats que sempre retindran les mateixes mesures. En tercer lloc és un mecanisme en el qual no queda clar com aplicar el concepte de marge d'error. Per tant aquest mecanisme imposa una sèrie de restriccions geomètriques que impedeixen obtenir molts dels resultats que una fórmula pura de càlcul sí permet obtenir, i per aquesta raó no considero l'estratègia basada en fixar les diagonals com una bona solució al problema exposat.

Altres mecanismes es basen en estratègies de caràcter geomètric per aconseguir la planicitat dels panells d'una superfície i poden ser tant senzills com subdividir la malla fins a fer que els quadrilàters siguin pràcticament plans. També hi han estratègies que es basen en analitzar la geometria i aplicar algun mecanisme geomètric complex que també ens permeti obtenir panells plans ¹⁷⁶. Aquest mecanismes rarament poden actuar en temps real i en general no permeten comprovar tendències mentre treballem. Tampoc són mecanismes que puguin interactuar directament amb el model de manera que no podem modificar-lo i per tant no poden fer propostes en base a les condicions que haguem establert. Aquestes limitacions són desavantatges importants de cara en treball que suposa generar una proposta viable o donar la millor solució, procés que acostuma a ser el fruit d'un procés d'exploració.

¹⁷⁶ Glymph, J., Shelden, D., Ceccato, C., Mussel, J., Schober, H., "A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets", 2004, *Automation in Construction* 13 2004 187– 202

4.4.1.1 *Malla de cordes rígides.*

Ja hem vist en descriure les malles de cel·la quadrada que es tractava d'un dels casos més arquetípics de simulació per a sistemes dinàmics. Ara, en afegir la funció de planicitat, veurem que el comportament de la malla varia i guanya una certa complexitat. En afegir aquesta funció, que es suma a les pròpies de la malla, la manera com aquesta reacciona a les accions del seu entorn s'altera, ometent totes aquelles configuracions que mostren una desviació dels vèrtexs dels plans excessiva i restringint així el moviment dels vèrtexs.

Si ens fixem en la figura ens adonarem que en donar prioritat a la funció de planicitat la forma canvia fent que el conjunt dels panells s'aplani i això tindrà un efecte especialment notable a les zones de més conflicte entre els plans i la geometria que en aquest cas les tindrem a les vores. Però com el sistema actua com un conjunt i les tensions es traslladen lliurement per la malla s'han format plecs o línies de tall a la part alta de l'estructura on no hi havia tantes tensions. Observem, doncs, que els problemes particulars d'una zona s'han fet extensius a tot el conjunt resolent-se de manera general i per tant donant així la millor solució tenint en compte el conjunt. En mirar el mapa de desviacions del pla, que mesura el marge de desviació dels vèrtexs respecte el pla mig, un pot comprovar com s'han reduït clarament les desviacions generals i per tant hem guanyat planicitat al conjunt gràcies a l'aparició de línies de tall. Això però s'ha cobrat un preu perquè la regularitat de les vores dels panells a les zones més afectades s'ha deformat.

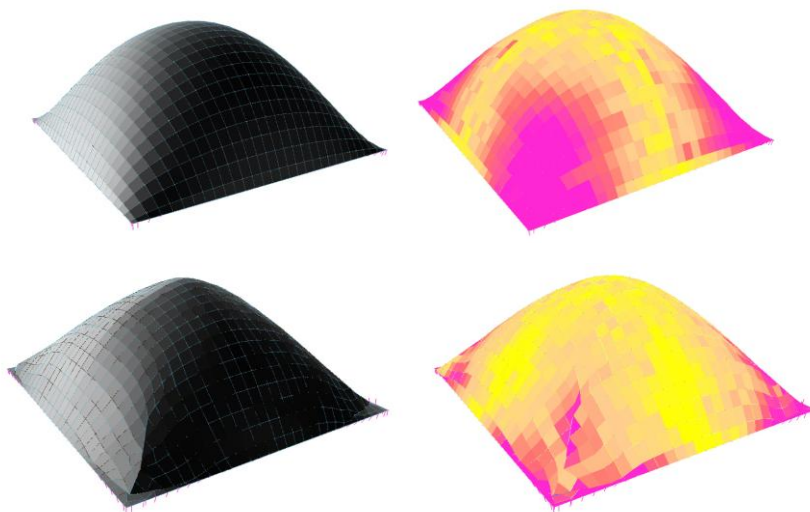


Fig 93. Dos casos de Malla quadrada amb un mapa de planicitat dels panells al costat (dreta), on els tons més grocs corresponen a una major planicitat i els tons més liles a una major desviació. En el cas de dalt les forces generals estan equilibrades, mentre que en el cas de baix s'ha donat molta prioritat a les forces del pla.

Normalment la major part de deformacions en el contorn acostumen a produir-se a les vores de les malles perquè són zones on s'estableix un conflicte entre la planicitat del panell i la deformació natural de la malla. Regulant els camps de força i donant prioritat a la planicitat dels panells el sistema genera diverses solucions per aquest problema de les vores. Aquestes

acostumen a ser molt irregulars i poden ser enteses com un plantejament o un esbós més que una solució final pròpiament dita. En general es produeixen línies de tall que divideixen la vora en diversos sectors. La solució més senzilla acostuma a passar per fer que aquestes línies de tall generin una zona plana a l'encontre de les dues cares. A partir d'aquesta forma inicial apareixen variants en les quals la superfície plana es torna esglaonada generant terrasses que s'estenen per la façana, etc.

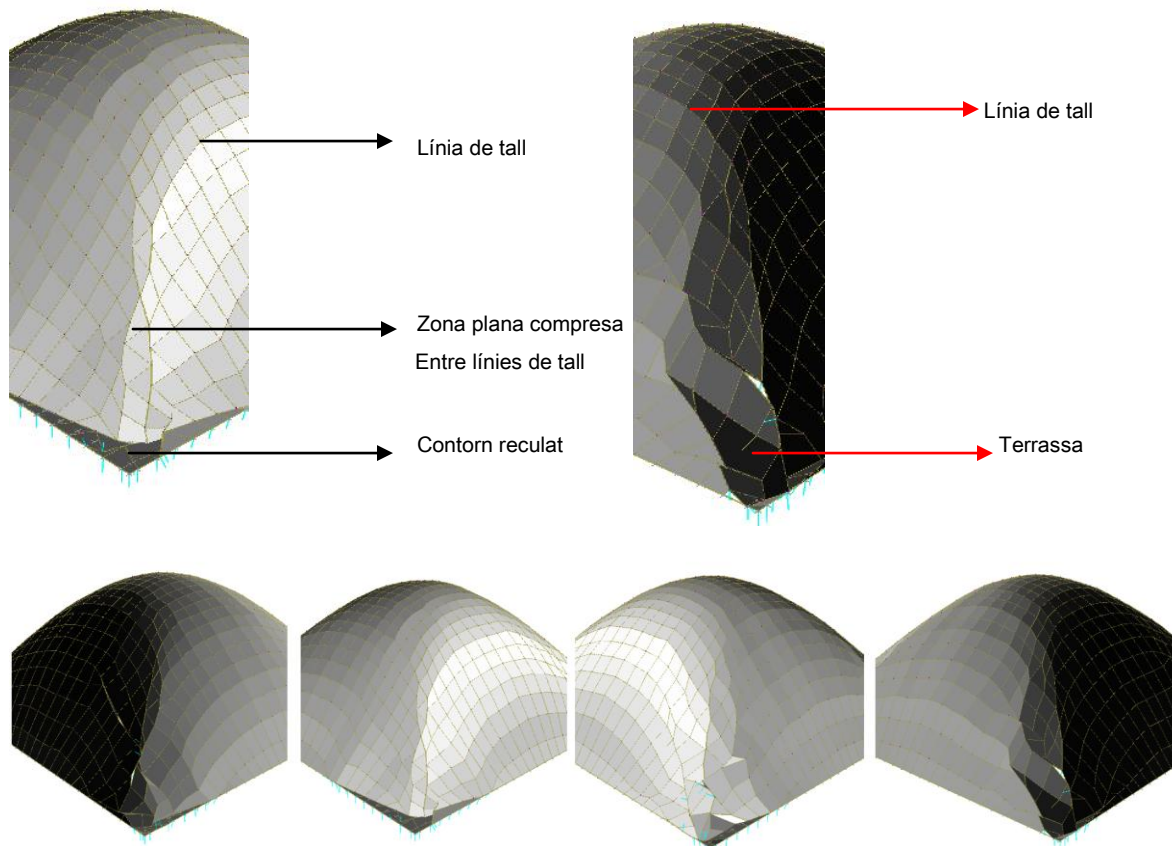


Fig 94. Com es pot observar el sistema ha plantejat la divisió de la superfície lateral en diverses superfícies que permetin una major flexibilitat del conjunt en aquell punt. A la part superior s'indiquen alguns dels fenòmens que tenen lloc en forçar la planicitat de les cares en les zones més conflictives.

També apareix la tendència a aplanar i situar al terra diversos panells de la vora fent recular així el contorn de la malla que s'arrodoneix perquè el perímetre quadrat entra en conflicte directe amb la condició de planicitat. És interessant dir que quan aquestes línies de divisió formen una regió tancada tots els panells compresos al mig igualen les seves normals, però si l'àrea queda oberta es difumina la seva planicitat pel conjunt de la malla. Per aquesta raó en observar les zones planes hem d'entendre que són el resultat d'aquestes rectes d'intersecció i no al revés i per tant en mirar una superfície quasi sempre veurem que està formada per talls que la

sobrepassen i continuen per l'estructura. Aquestes solucions de vora afecten a tota l'estructura ja que tots els elements estan connectats. A causa d'això la morfologia general s'adapta a aquest conflicte lateral i si li donem prou estona observarem fenòmens peculiars en els quals començaran a passar coses en zones en les quals aparentment no apareixien tensions. D'alguna manera el conflicte geomètric de la vora s'ha estès a la resta de l'estructura i s'ha concentrat a la façana generant una morfologia peculiar on es poden generar voladissos, línies divisòries, etc.

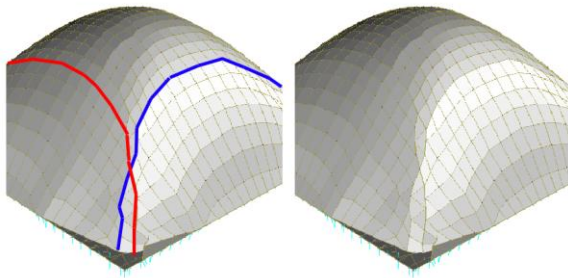


Fig 95. En aquest cas les línies de tall ens estan indicant una possible racionalització de la forma com a intersecció de dos meitat de cercle cosa que ens permetria generar aquesta morfologia a partir de peces planes.

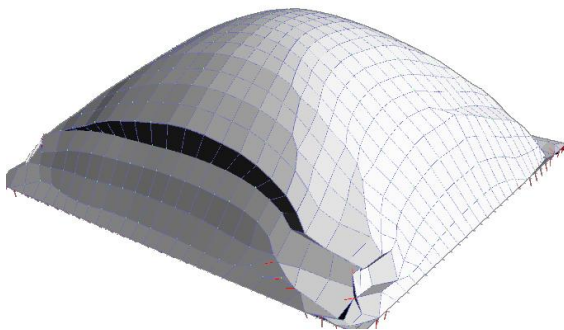


Fig 96. El conflicte geomètric a la vora s'ha estès a la façana donant lloc a una solució global del conjunt. El sistema ha orientat la figura cap a una banda i ha perdut la simetria inicial, concentrant, doncs, els problemes de façana només en un costat.

Val a dir que aquesta solució és asimètrica tot i haver partit d'una figura regular cosa que és resultat de la manera com es reparteixen les forces perquè en fer servir un sistema que és capaç de transmetre les tensions d'una banda a l'altra a través de les cordes i dels plans que formen la malla aquestes s'han traslladat d'un costat a l'altre. En fer això es pot concentrar o dispersar les tensions lliurement en qualsevol punt de la malla, i com la geometria va definida per els camps de força el que realment fa és traslladar els problemes geomètrics d'una banda a l'altra.

Val a dir que fins que el problema geomètric no quedi resolt, amb la precisió que nosaltres li donem, el sistema no s'estabilitza plenament i per tant seguirà buscant i buscant alguna manera de poder estabilitzar les seves tensions internes. El resultat poden ser decisions que a nivell de disseny podrien arribar a ser vàlides o que si més no ens donen una pista dels problemes geomètrics que s'estan produint en el conjunt del model. Així, doncs, no només tenim un mecanisme que permet detectar problemes geomètrics sinó que a més és capaç de concentrar-los en una zona. En el cas exposat a la figura es pot veure com les tensions s'han concentrat en una de les façanes que aparentment no tenia tensions importants, llavors el sistema comença a

treballar per solucionar aquesta peça. La solució que ofereix passa per generar una mena de visera que sobresurt del conjunt de la façana i que a l'hora està fent de línia de tall entre la volta i la façana principal. D'aquesta manera resolent un problema geomètric ha prioritzat una de les façanes per sobre de les altres.

Aquest sistema ens està oferint una solució que pot ser arquitectònica i que pot tenir-se en compte a l'hora de fer el model definitiu. Val a dir que tot i que encara presenta algunes mancances que fan que no sigui directament construïble s'hi ha dedicat un temps molt curt a la confecció dels models i segurament si es dediquessin hores al desenvolupament de les figures es podrien obtenir sistemes molt més interessants. Pot ser un estudi interessant comprovar com es comportarà tot el conjunt en un procés més lent i precís de modelatge en el qual possiblement el resultat final pugui arribar a tenir un nivell de precisió suficient com per a la seva construcció, però això ho farem més endavant. Un altre fet important és que d'alguna manera aquest sistema ofereix una base lògica amb la qual justificar el que d'una altra manera serien decisions purament "projectives". Un "gest" realitzat amb aquesta metodologia es pot explicar com el resultat lògic de sotmetre un model a unes accions determinades. A partir del procés d'equilibri de forces apareixen una sèrie de morfologies que no són arbitràries sinó el resultat d'un procés algorísmic i per tant li dóna una base de suport teòric al disseny de l'arquitecte. En un món on cada cop cal justificar i ajustar millor les nostres accions aquesta pot ser una eina útil que permeti unificar el disseny i l'optimització en un sol procés.

4.4.1.2 Amb cordes flexibles

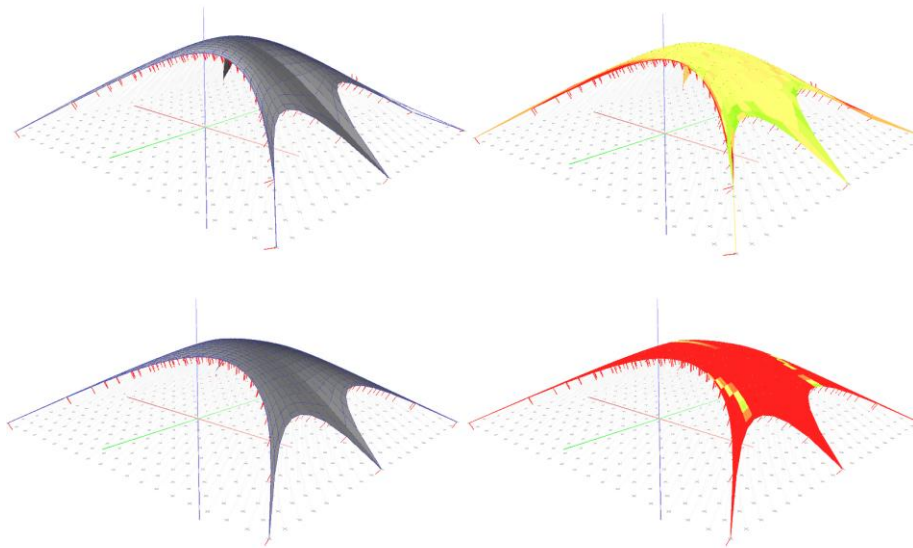


Fig 97. En la següent figura veiem 2 malles i els seus respectius mapes de planicitat de les cares. El que podem observar és que mentre que a nivell formal no hi ha canvis notables en la geometria, la planicitat general varia notablement quan es dóna prioritat a les forces del pla (dalt) a quan no se'ls hi dóna (a baix).

En treballar amb malles quadrades de panells formades per cordes elàstiques ens trobarem amb un canvi important en el comportament de la malla ja que treballarem amb sistemes tènsils que tendeixen sistemàticament a produir superfícies mínimes i elements de geometria funicular. Aquests es combinen amb les forces del pla de manera que en barrejar dos estratègies de treball diferents en un únic model obtindrem un comportament híbrid que combinarà propietats de tots dos camps. Com veurem en aquest cas el procés de panel·lització no és tant notori a nivell formal al no produir canvis tant visibles en l'estructura, la qual cosa no vol dir que no actuï i que no estigui resolent problemes significatius de cara a l'optimització del model o a la seva futura construcció, simplement aquests no són tant apreciables.

En barrejar un sistema de malles tènsils amb un sistema de plans a nivell geomètric no obtindrem arcs funiculars purs o línies de tall rectes sinó elements mixtes entre totes dues classes de d'elements. Les divisions entre diferents zones de plans no tenen forma de plec sinó que més aviat prenen la forma d'un arc funicular divisor. Si a més ens fixem en el exemples exposats veurem que aquest arc divisor té tendència a generar un enfonsament a la part central a la malla. Això es deu a que, a diferència del cas anterior en el qual les línies de divisió produïen diferents zones planes, ara, degut al fet de que les dues zones separades per l'arc funicular es comporten com dues malles tènsils independents, es generen dos voltes funiculars a cada banda de l'arc divisor. Quan eliminem l'acció de les forces del pla aquest fenomen no passa ja que la superfície té tendència a ser una volta llisa. Una altra característica de les rectes de divisió en malles elàstiques és que neixen del terra perquè van a buscar suports, cosa que en el cas de les cordes rígides no passava. Ens trobem, doncs, davant una nova varietat de línia de fractura però que en aquest cas està afectada pel comportament de la malla i pren forma d'arc funicular. És per tant un tret característic de la força del pla el generar línies de fractura a l'estructura per tal d'aplanar les seves cares i en combinació amb altres estratègies generals dóna lloc a híbrids que produeixen estructures mixtes.

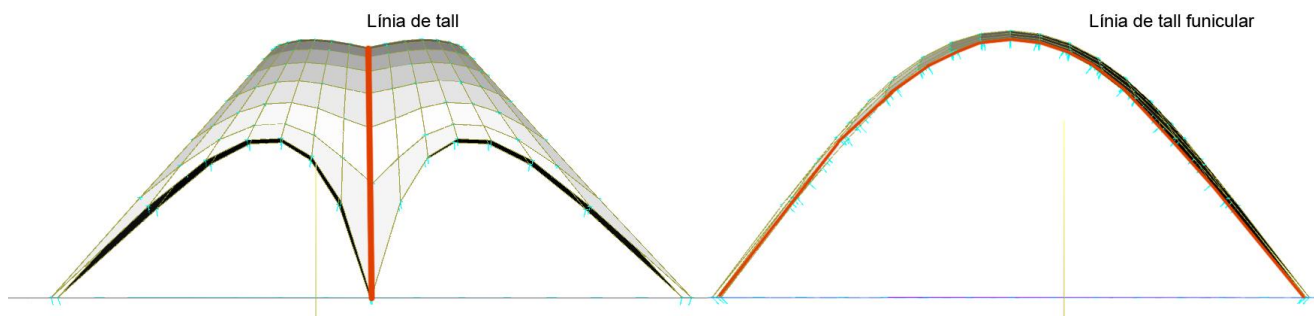


Fig 98. Alçat frontal i lateral de la línia de tall en una estructura de cordes elàstiques en la que s'ha forçat la planicitat dels panells, apareixent línies de tall funiculars.

4.4.2 Panells sobre malles hexagonals

Com hem vist a les tipologies de panells quadrats les possibilitats formals d'aquests mecanismes són molt extenses ja que cada nou camp de força es pot combinar amb els anteriors per donar lloc a noves possibilitats. A aquest fet cal afegir que els aspectes geomètrics de la malla influencien en la manera com aquesta deforma quan entra en càrrega ja que la distribució de les forces varia segons les connexions i les longituds de les barres. En el cas de les malles hexagonals observarem un comportament lleugerament diferent a causa de la geometria dels seus panells que doten al conjunt d'una sèrie de propietats particulars. Un dels aspectes més importants de malles hexagonals és que els eixos de simetria no són els habituals X i Y si-nó que manté tres eixos al voltant dels quals creix l'estructura tal com hem vist en l'apartat sobre les malles hexagonals¹⁷⁷. Com veurem això comporta una lògica de creixement diferent. Els panells hexagonals tenen avantatges importants respecte els panells quadrats perquè presenten menys connexions per node cosa que fa estructures més econòmiques que no pas els les malles quadrades o triangulars. És interessant remarcar que les malles hexagonals han estat proposades com un sistema molt més adequat que els triangles o el quadrats a l'hora de definir l'esfera terrestre perquè s'adapten molt millor a la curvatura de l'esfera¹⁷⁸.

A nivell de programació però comporten moltes més dificultats que no pas els panells quadrats ja que tenen una geometria més difícil d'avaluar i de controlar. En treballar amb tres direccions i no estar basats en una quadricula, la subdivisió d'una malla d'aquestes característiques no és ni molt menys immediata i per tant algunes tècniques de panel·lització no es poden aplicar amb la mateixa facilitat. De cara al càlcul un dels avantatges dels sistemes de simulació física és que tota mena de problemes geomètrics de difícil tractament matemàtic poden ser operats amb un únic mecanisme i els panells hexagonals no en són una excepció. En aplicar forces dinàmiques basades en els components bàsics de totes les figures geomètriques puc definir dinàmicament qualsevol figura i fer-la comportar-se de manera que no perdi la seva geometria o alguna de les seves propietats a partir del control dels camps de força que la defineixen. Així, doncs, simular una malla de panells quadrats o hexagonals és exactament el mateix a nivell dinàmic perquè la simulació es redueix a la combinació de camps de força basats en partícules, barres o plans. Així com passava en el cas de les malles quadrades, el sistema tendeix a buscar línies de tall, ja que

177 Wang, W., Liu, Y., "A note on planar hexagonal meshes", 2010, *The IMA Volumes in Mathematics and its Applications* Volume 151, 2010, pp 221-233

178 Sahr, K., White, D., Jon, A., Kimerling "Geodesic Discrete Global Grid Systems" 2003 *Cartography and Geographic Information Science*, Vol. 30, No. 2, 2003, pp. 121-134

aquesta és una propietat derivada de la funció de planicitat i sembla ser independent de la geometria de contorn que li donem. Els conflictes de vora que abans havíem observat aquí s'han suavitzat en gran mesura ja que les peces tenen menys restriccions a l'hora d'adaptar-se a condicions del contorn. Això els permet generar vores amb molta més facilitat que no pas els sistemes quadrats. Val a dir que com hem vist anteriorment en la malla hexagonal de cables quan fem servir aquest sistema dinàmic les malles quadrades poden ser enteses com un cas particular de malla hexagonal i per tant és lògic que tinguin una major capacitat d'adaptació a les formes sense donar peu a conflictes. Així, doncs, ens trobem davant un mecanisme molt més versàtil que pot aplicar-se en una major varietat de casos i que ens obligarà a plantejar models nous per comprovar les seves capacitats ja que fins ara els models emprats donaven lloc a situacions de curvatura relativament senzilles que, tot i haver estat adequades per demostrar el comportament de les malles quadrades, no mostren tota la capacitat del sistema hexagonal.

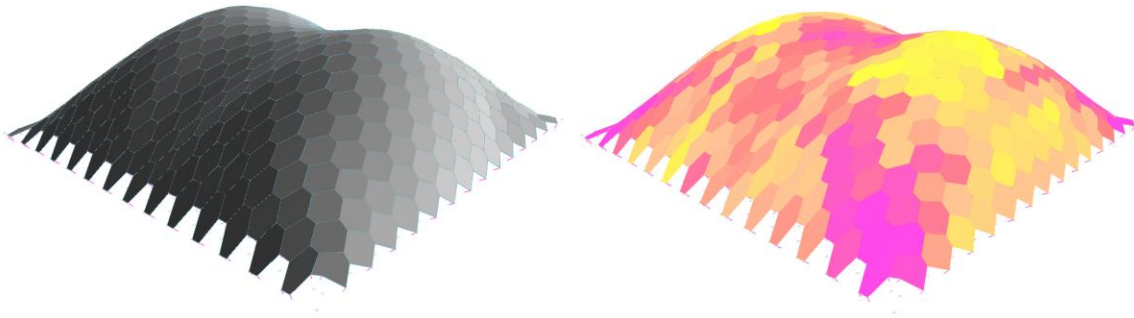


Fig 99. En la següent figura veiem una malla hexagonal amb el seu mapa de planicitat de les cares. La malla ha estat fixada per les seves vores, de contorn quadrat, i se li ha aplicat una força general en sentit invers a la gravetat. Com podem observar el sistema ha elevat la malla i ha optat per solucionar el problema de la planicitat de les cares dividint el conjunt en dos grups. Els panells tenen desviacions del pla que es mouen entre 7 i 1 cm per a una superfície mitja de 9 m².

A causa d'aquesta major capacitat d'adaptació les malles Hexagonals acostumen a presentar una major varietat tipològica de panells quan prioritzem les funcions del pla. Aquest fenomen, que ja l'havíem observat en treballar amb les malles hexagonals quan tenien més tensió en un sentit que en un altre, entra en combinació amb modificacions produïdes pel mateix procés d'aplanat dels panells que per si mateix també genera tipologies molt peculiars. El que obtenim és que l'hexàgon degenera en pentàgons, quadrats, o fins i tot desapareixerà, cosa que a les línies de tall passarà sovint. També apareixen un seguit de tipologies molt curioses de malles de panells hexagonals que no són molt comuns. Alguns cops degenera en malles quadrades de panells intercalats, però altres cops degenera en malles quadrades autèntiques, sense intercalar elements o produeix sanefes donant lloc així a una gran varietat de possibles malles derivades de la malla hexagonal inicial. Aquesta capacitat de donar lloc a diferents tipologies de malla la fa

un cas molt més excepcional i únic que la malla quadrada ja que amb una sola varietat de peça pot produir diferents dissenys aptes per a múltiples casos, cosa que la malla quadrada no podia fer. El més important és que ens dóna idees sobre possibles tipus de panells que fins ara no s'han fet servir i que poden ser molt més flexibles que les actuals tipologies purament basades en models estrictament geomètrics i regulars. Aquests models a més coincideixen amb algunes formes naturals que han evolucionat poc a poc al llarg de milions d'anys, segurament en veure's sotmeses a curvatures similars i sobretot perquè en tenir en compte les tensions que pateixen, cosa que és essencial per avaluar correctament la seva morfologia, acaben produint solucions similars. És precisament aquest fet el que pot corroborar la capacitat del sistema dinàmic per donar lloc a models que siguin realment eficients i funcionals tot i la complexitat de les pressions a les quals es veuen sotmesos. És, doncs, lògic assumir que si accidentalment el sistema ha donat lloc a diverses formacions molts similars a les naturals possiblement moltes altres també es puguin obtenir a partir del mateix principi.

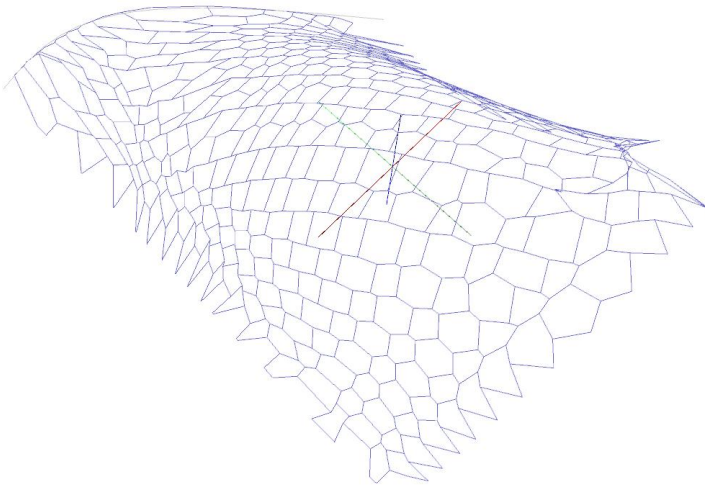


Fig 100. Malla hexagonal sobre NURBS. Mentre les vores es mantenen alineades per mitja d'una funció vectorial i els quatre extrems romanen fixats, els punts centrals de la malla es veuen atrets per la superfície NURBS adaptant els panells a la superfície de la mateixa.

En provar aquest cas sobre una figura on tenim situacions de curvatura més complicades, ens trobem que la malla genera algunes línies de tall, tal com ja havíem anunciat anteriorment, per tal de retenir la planicitat del conjunt. Però a més podem observar diverses situacions on els panells han anat adaptant-se de maneres molt diverses a les diferents situacions de curvatura i de tensió. En observar la figura veiem com ha resolt la corba a partir de múltiples franges que giren lleugerament sobre si mateixes resolent així amb peces planes una curvatura de certa dificultat. Al mateix temps ha escollit peces més petites per la zona de major curvatura mentre que les peces de major dimensió les ha col·locat a les zones de menor curvatura. Per altra banda ha escollit diferents tipus de morfologies de panell per cada zona de manera que segons les tensions a les quals es veuen sotmeses les peces el sistema escull un tipus o un altre de peces. Fixem-nos en les similituds que hi ha entre aquesta figura i les escames de molts animals ja que

de la mateixa manera que el cas present, la pell intenta resoldre el problema de donar flexibilitat a una superfície composta de peces rígides.

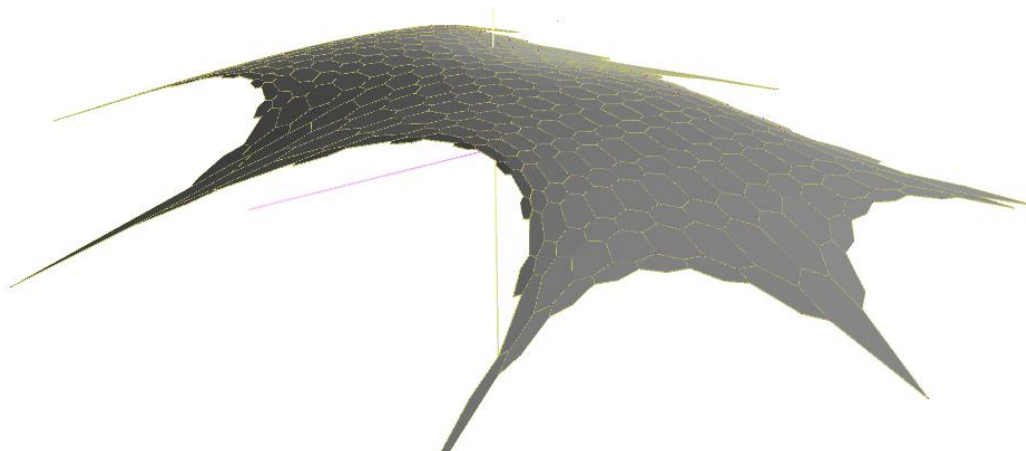


Fig 101. Sistema tènsil de malla hexagonal on podem observar com s'ha guanyat uniformitat en tot el conjunt. Tot i això encara trobem diferents tipologies entre les peces centrals i les peces de vora. Fins i tot si ens fixem a les peces centrals veurem un fenomen, difícil d'explicar, en el qual apareixen dues varietats de panells hexagonals intercalats entre ells.

En aplicar malles tènsils al sistema hexagonal, els panells tendiran a perdre la varietat formal que hem vist fins ara. En uniformitzar el repartiment de les tensions els panells també han uniformitzat la seva morfologia ja que aquesta depenia en gran mesura de l'estat tensional. Tot i això encara hi hauran variacions segons la zona, ja que en els sistemes tènsils no totes les zones treballen exactament igual. Especialment accentuat serà l'estirament que patiran les peces situades a les vores, que com hem vist anteriorment són les parts que més treballen en els sistemes tènsils. Tal com passa en els sistemes d'arcs i voltes, els arcs són el elements que suporten les voltes i per tant els que més tensions carreguen. A les malles tènsils el fenomen invers té lloc i les vores són la zona on més s'acumulen les contraccions de tota la malla. En aquest punt trobem que els panells s'han estirat en comparació a les parts més centrals, fins al punt que alguns casi han desaparegut. Tot i això no és només a les vores on apareixen aquestes irregularitats, curiosament a les parts centrals de la malla trobem que ens apareixen dues classes de panells intercalats entre ells, cosa que no seria d'esperar en un sistema uniforme en el qual tots els panells haurien de sortir iguals segons la seva zona. A les zones centrals en canvi es divideixen entre uns elements allargats i uns altres de més petits i regulars. El per què d'aquesta configuració en la morfologia dels panells arrenca dels problemes de relació entre la malla hexagonal i el contorn quadrat de la malla. Fixem-nos, doncs, que els panells estirats corresponen a les zones on no hi ha panell a la vora.

4.4.3 Panells sobre malles lliures

En aquest cas és on més es nota la versatilitat del sistema per avaluar i combinar qualsevol tipologia de panell. De la mateixa manera que podem generar una combinació aleatòria de cables i formar una malla, els hi podem afegir panells als espais que deixen entre ells de tal manera que obtenim una malla aleatòria de panells. Aquesta malla pot ser avaluada per estudiar la manera com reacciona davant els diferents estats tensionals i com es comporta per adaptar-se a casos complexos de curvatura.

Val a dir que el comportament del conjunt en aquesta mena de casos és relativament caòtic a causa de l'enorme varietat morfològica que presenten, això els fa poc atractius a primera vista, però permet tractaments en els quals el model guanya harmonia i uniformitat. De fet un dels casos més interessants estan en aplicar un sistema de cordes elàstiques a una malla irregular de panells aplicant una tensió interna de retracció, llavors obtenim autèntics hexàgons, pentàgons i quadrats combinats ordenadament que deriven d'un sistema completament atzarós. En aquest sentit cal tenir en compte que el sistema de cordes elàstiques no serveix únicament per simular malles tèxtils o obtenir superfícies mínimes, alhora permet millorar i racionalitzar el disseny durant la fase projectiva.

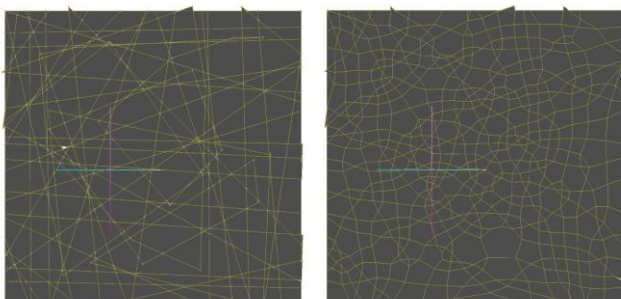
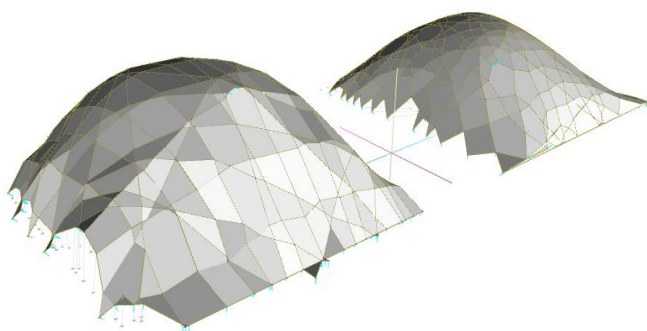


Fig 102. Procés de racionalització de malla irregular. L'estat original a l'esquerra, i l'estat final a la dreta, es pot observar com a partir de formes aleatòries obtenim combinacions de diferents tipus de panells molt més uniformes (dalt), a nivell volumètric (baix) els canvis també es fan notoris en observar molta més suavitat en el contorn de la dreta (optimitzat) que en el de l'esquerra sense optimitzar.



Una propietat d'aquestes malles és la gran flexibilitat que mostren perquè com es pot observar a les figures la morfologia inicial es conserva molt més íntegra sense patir les deformacions que en els casos anteriors tenien lloc en donar prioritat a la funció de planicitat per sobre de les altres. Si

fem això en aquest cas veurem que no té un efecte gaire significatiu en el conjunt, deixant-lo pràcticament igual al seu estat inicial. Tot i això de manera més regional si que ens apareixeran algunes anomalies com talls o conjunts de plans iguals, que en qualsevol cas tindran un caràcter residual. Aquesta diferencia de comportament tant notable respecte les altres malles es troba en el fet de que les malles organitzades de manera homogènia només poden assumir accions en alguns sentits, però no en tots, de manera que si es dóna una acció que no coincideix amb aquestes direccions, el sistema no té manera de respondre des de la seva morfologia inicial i ha de canviar forçosament. En canvi les malles irregulars, en combinar diferents tipologies i estar organitzades de manera completament aleatòria, sempre troben la manera de respondre a les accions sense canviar la seva morfologia general. Degut precisament a això són models molt més versàtils i preparats per situacions més difícils i complexes que en ser una combinació caòtica de panells permet plecs i particions en quasi tots els sentits. Aquest fet fa que no es generin línies clares de tall, tal com si passava amb els sistemes més rígids i uniformes de malles quadrades i hexagonals cosa que demostra la seva flexibilitat.

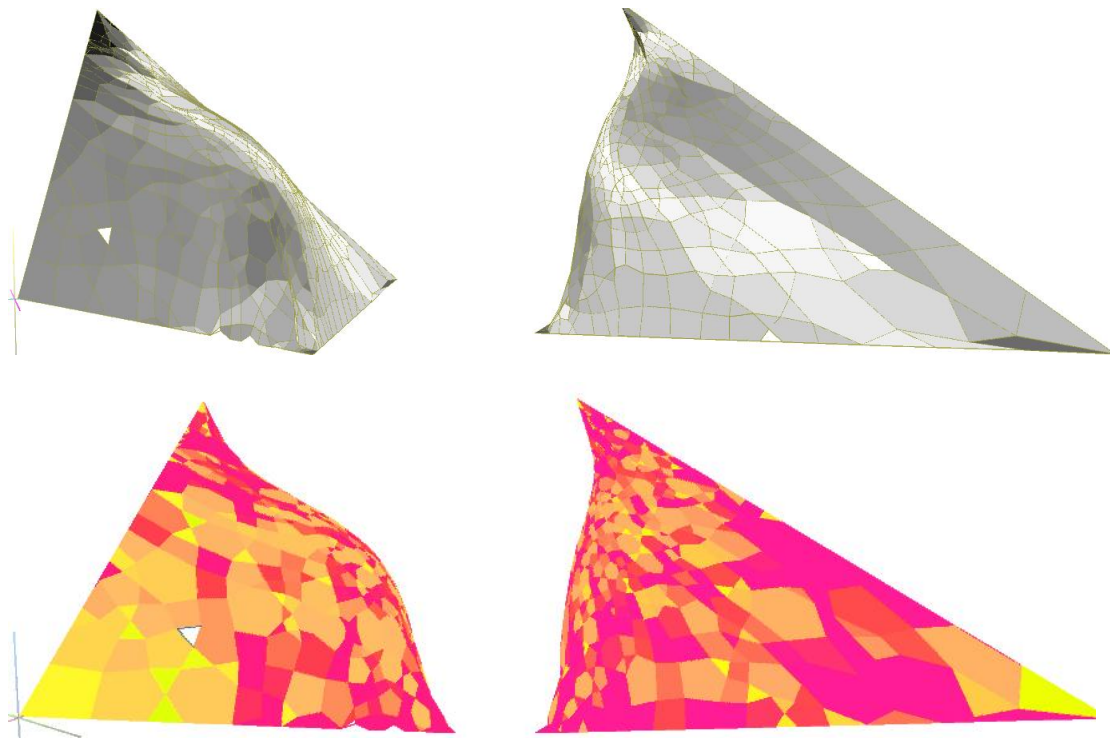


Fig 103. En aplicar la malla optimitzada sobre una cas complex de curvatura, el model conserva amb gran fidelitat la curvatura inicial, variant sobretot el tractament de la vora. Com podem observar en el mapa de planicitat, els panells plans i els no tant plans es combinen i es barregen per tota l'estructura, sense crear zones clarament diferenciades. Això fa que el sistema no deformi algunes zones front de la resta. Tot i que alguns triangles no mostrin una planicitat del 100% això es deu a una continua oscil·lació dels seus punts que a causa de les peculiaritats de la formula de planicitat fa que el sistema en detecti tensió, si es veies la imatge que ofereix el programa veuríem que el color dels triangles oscil·la contínuament. Però òbviament un triangle mai deixa de ser pla.

També cal afegir que la presencia de triangles pot ser un dels factors que doni flexibilitat al sistema, perquè són elements que sempre són plans i per tant poden deformar-se lliurement, actuant, doncs, com un element de "comodin", permet a la malla adaptar-se amb menys dificultats a les condicions de contorn. Així doncs, plantejar malles amb elements triangulars intercalats a les zones conflictives podria donar lloc a tipologies quadrades i hexagonals amb una elevada capacitat d'adaptació a les diferents curvatures.

4.4.4 Panells amb angles fixats

Com hem vist, la geometria del contorn dels panells acostuma a perdre's en el moment que l'estructura comença a patir deformacions importants. Com que no sempre ens interessa perdre la geometria dels panells perquè hi ha vegades que això pot encarrir el procés de producció hem intentat veure quina mena de resposta podien donar els sistemes dinàmics a aquest problema. Solucionar-ho afegeix una nova dificultat al procés de panel·lització perquè ens obliga no només a trobar panells plans sinó a trobar-los amb una geometria determinada i a establir quins seran els factors que determinen la forma del panell. Per resoldre-ho hem optat per dividir el problema en múltiples problemes senzills i anar-los resolent un a un fins assolir el resultat final. Hem començat per mantenir l'angle entre els costats de manera que la morfologia general es mantingui.

En investigar com retenir la forma dels panell ens apareixen dos criteris fonamentals que cal controlar de cara que aquests no perdin la geometria del seu contorn, que són els angles entre les arestes del contorn i les longituds d'aquestes. En general, controlar les longituds no és per si sol una estratègia que tingui uns efectes gaire positius sobre el model ja que encara que aquestes longituds es mantinguin, els contorns es deformen molt si no mantenim els angles fixats i el resultat és igual de dolent a nivell constructiu que si no apliquéssim cap funció correctora. En aquest sentit mantenir les longituds fixades ens pot servir per casos particulars o en combinació amb algun altre mètode però no sembla ser una estratègia gaire eficaç.

Fixar els angles en canvi té uns efectes molt més positius sobre el model perquè manté de manera més integrada la morfologia general i encara que els costats variïn de longitud sempre retindrem la morfologia del contorn. Això permet obtenir malles adaptables que retenen part de la geometria de les seves cel·les a mesura que es deformen presentant solucions que s'acosten més al nostre objectiu de panel·litzar amb el mínim de variacions respecte la geometria original de les peces. Encara que mantinguem els angles observarem variacions importants respecte a la longitud dels costats, per exemple, un quadrat fàcilment degenera en rectangle si només

mantenim el valor dels seus angles, però aquest problema es planteja de manera més assequible de resoldre que no pas aplicant altres aproximacions.

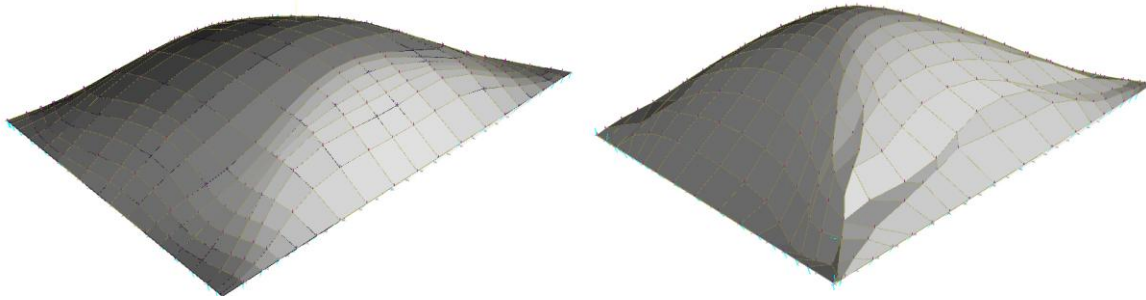


Fig 104. A la figura podem veure dues malles amb propietats diferents, mentre que a la de l'esquerra s'ha inclòs una funció angular que intenta retenir els angles a 90° graus en tots els panells, a la de la dreta aquesta funció no actua. Com podem veure el resultat varia notablement.

En general les conseqüències d'aplicar una funció angular a una malla passen perquè aquesta sigui capaç de retenir una certa continuïtat en la morfologia dels panells, el que ens trobarem habitualment serà que es formaran franges de tipologies més o menys uniformes delimitades per alguna de les direccions principals de la malla. Aquestes franges però patiran variacions i com menys intensa sigui l'acció angular, mes variacions es produiran. On si que observarem variacions importants serà a les longituds dels costats, que alternaran indistintament entre diferents tipus de quadrilàters que tindran tots els seus costats a 90° graus, però sense mantenir cap uniformitat a les seves mesures.

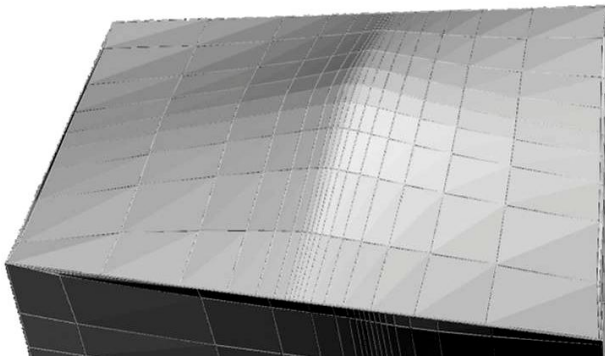


Fig 105. Es pot veure a la figura com els panells mantenen tots els seus angles a 90° però les mesures dels seus costats són generalment diferents. Com es pot veure s'acumulen mes rectes de tall a la part central que és on hi ha la major curvatura.

A diferència del que passava quan els angles dels panells eren lliures, ara no es formaran línies de tall a la malla. Això es deu a que la formació de línies de tall està inevitablement lligada a la capacitat de deformar lliurement els angles. Com que ara els panells no poden patir les deformacions angulars adients, el sistema no pot produir línies de tall. Aquest fet fa que la malla sigui molt més rígida respecte a les deformacions i per tant tendeix a aplanar-se a mesura que passa el temps. Tot i això les línies de tall no es pot dir que hagin desaparegut realment ja que el

sistema busca un altre recurs menys eficaç però molt similar per adaptar-se a les formes corbades que consisteix en concentrar les línies naturals de la malla en grups que intentaran imitar línies de tall. En concentrar en feixos aquests plecs de la malla es produeixen zones d'alta densitat de panells que es corresponen amb els punts més conflictius, mentre que deixa altres zones amb molt poca ocupació. Aquesta tipologia és, doncs, més rígida que els sistemes amb angles lliures, tot i que seria un exercici interessant el combinar ambdues tipologies de panell en una única malla a veure quin resultat produeix. Hem observat també que el mantenir els angles a 90° graus indirectament també es mantenen les cares dels panells planes encara que les accions del pla no actuïn. Això és molt important perquè ens indica que en aquests casos la planicitat dels panells està sostinguda per l'acció de dues forces diferents (les angulars i les del pla) i que només amb funcions angulars es poden mantenir les cares d'una malla plana. Aquest cas es pot simular i el resultat és un tipus de panel·lització que es comporta de manera diferent al que hem observat fins ara però que no dona prioritat directa a la planicitat dels panells sinó que això s'obté de manera molt residual.

Quan treballem amb malles tènsils els panells amb angles fixats es comporten de manera diferent a com ho havien fet fins ara ja que el conjunt es veurà sotmès a una nova constricció. Una de les conseqüències d'aplicar un sistema d'angles fixats és que els panells seran molt més resistents a les deformacions del seu contorn i per tant tindran més tendència a retenir la seva superfície sense canvis significatius. Això entra en contradicció directa amb el sistema de superfícies mínimes que és el resultat d'aplicar cordes tènsils a la malla. El resultat d'aquest conflicte de forces acostuma a ser un tipus de geometries en forma de flor, on les vores queden esteses mentre les parts centrals es contrauen. Aquest fenomen es pot explicar si entenem la manera com estan actuant les diferents forces. Per una banda, en fixar els angles dels panells, la malla té tendència a canviar de manera regular, això vol dir que els canvis de la forma es fan de manera que no alterin els angles a 90° graus dels panells i això només pot tenir lloc arronsant-se en els sentits principals de la malla. Per altra banda si l'angle d'una peça canvia això afectarà als angles de la peça següent de manera que els canvis angulars es transmeten de peça en peça i es van repartint d'aquesta manera pel conjunt. En fixar uns punts de suport, el sistema no pot contraure's en els sentits principals de la malla perquè té les vores fixades de manera que només pot deformar alterant els angles. Així, doncs, apareix una contradicció entre la força de contracció i les forces angulars. En ser un sistema dinàmic les deformacions angulars, encara que petites, es van acumulant i arriben al seu màxim a les parts centrals de la malla que són els punts més allunyats dels extrems. Com més ens allunyem dels vèrtex fixats de la vora més girs acumulats i més deformacions trobarem. Així, doncs, a les parts centrals serà on s'acumularan les majors deformacions angulars i serà en aquesta zona on es significarà més la tendència a produir superfícies mínimes que li estan donant les cordes tènsils. El conjunt, doncs, acaba generant una forma de flor en la qual les forces angulars i tènsils estan en equilibri mutu.

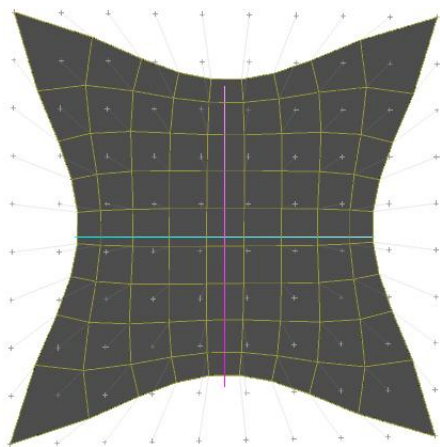


Fig 106. Exemple de malla amb angles fixats i tendència a produir superfícies mínimes. Com podem veure la tensió de la retracció generada pel sistema tènsil s'ha centrat a les parts centrals mentre que els extrems romanen fixats. Es fa evident com entren en conflicte les forces tènsils i les forces angulars per donar lloc a la curvatura en forma de flor de les vores.

Quan tenim tantes forces actuant sobre un sistema, és essencial regular la intensitat dels camps de força per tal de generar models que donin prioritat a algun aspecte geomètric. Si per exemple prioritzem les forces del pla veurem que el sistema tendeix a generar superfícies amb un sol grau de curvatura, mentre que si prioritzem les forces angulars obtindrem un model més proper a una superfície tènsil estesa. Un cop regulades les diferents forces el model tendeix a convergir poc a poc cap a una solució. En regularitzar els seus angles i treballar amb quadrats, el sistema intenta fer paral·leles totes les arestes dels panells i com que aquests estan connectats entre ells per extensió tota la malla intenta ser paral·lela. Una derivació geomètrica d'aquesta condició és que el sistema no admet que la malla tingui doble curvatura sinó curvatura en un sol sentit.

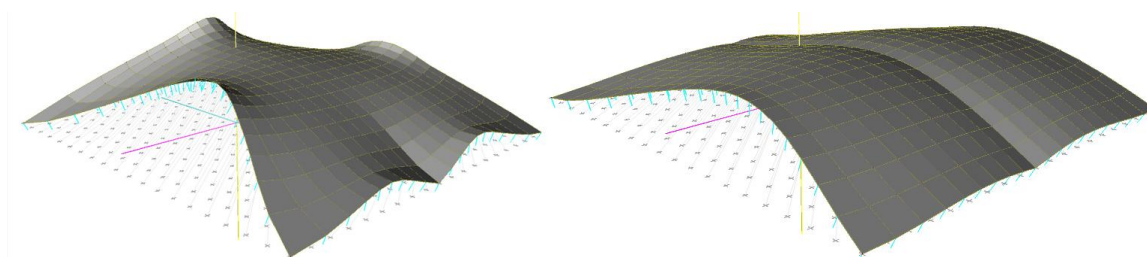


Fig 107. En la següent figura veiem dos casos en els quals s'han aplicat forces angulars, cordes tènsils i funcions del pla. A la figura de l'esquerra s'han igualat les forces angulars amb les forces tènsils, mentre que a la de la dreta s'han prioritzat les funcions angulars. Com es pot observar el increment de les forces angulars ha comportat la partició de l'estructura en dos blocs.

Val a dir que en prioritzar les funcions angulars el sistema clarament regularitza la disposició general dels panells tot i el fet que ha d'entrar en competició amb altres forces, i no pot evitar el fet de que aquests pateixin deformacions angulars acumulatives de manera que acabem obtenint franges de panells similars però no exactament iguals. Aquest fet, tot i fer més homogènia la morfologia dels panells només ens acosta però no arriba a complir al 100% el nostre objectiu.

Cal tenir en compte però que l'obra té uns marges d'error i que per tant si aconseguim que el nostre model es mogui dins aquests marges podrem obviar l'error aparent .

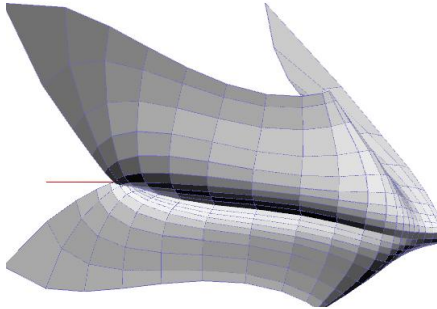


Fig 108. En la següent figura veiem un cas de panel·lització on, en regularitzar els angles, no hem obtingut panells exactament iguals sinó franges de panells que pateixen una petita deformació. Si es dóna el cas de que aquesta deformació està dins uns marges que nosaltres fixem, tot el model es farà llavors construïble per complexa que sigui la seva forma.

Per al futur ens cal poder establir uns marges d'error per a les funcions angulars i al mateix temps poder visualitzar la deformació angular de manera ràpida. Tots aquests mecanismes ajudarien a visualitzar ràpidament quines són les condicions geomètriques que està complint el model i per tant saber si amb uns marges determinats el nostre projecte és construïble o no. Fet això es disposarà d'una eina de comprovació geomètrica potent i al mateix temps de disseny que ens permetria tenir un control mètric i geomètric a les fases inicials del projecte i per tant donar lloc a dissenys més eficients tan a nivell estructural com a nivell constructiu.

4.4.5 Malla hexagonal amb angles fixats

En el cas dels panells hexagonals hem de tenir en compte que les propietats geomètriques d'aquests són diferents a les dels quadrats, ja que com hem vist aquesta tipologia no té dos eixos de simetria sinó tres. En aquest sentit el que observarem és que el creixement de les peces es produirà en tres possibles direccions en les quals els hexàgons tenen llibertat per créixer. Segons la direcció de les accions les peces escolliran un sentit de creixement, però la varietat de malles que podríem obtenir amb el sistema hexagonal, en restringir la llibertat de moviment angular, quedarà reduïda a un grup diferent de casos en els quals apareixeran nous tipus de configuracions que per altra banda sense retenir els angles no són possibles. Entre elles trobarem les malles de tipus quadrat amb vores de xamfrà, les hexagonals pures, també algunes varietats de romboïdals, i malles hexagonals estirades en les quals els panells han crescut en alguns dels sentits de les diagonals. En comprovar les diferències entre una malla amb angles fixats i una malla on els angles es mouen lliurement veiem que les tipologies que sorgeixen són clarament diferents. Tot i això hem de recordar que les funcions dinàmiques no són estrictes sinó que presenten un marge d'error variables segons la magnitud de les tensions implicades, així, doncs, les funcions angulars són una tendència més que un fet.

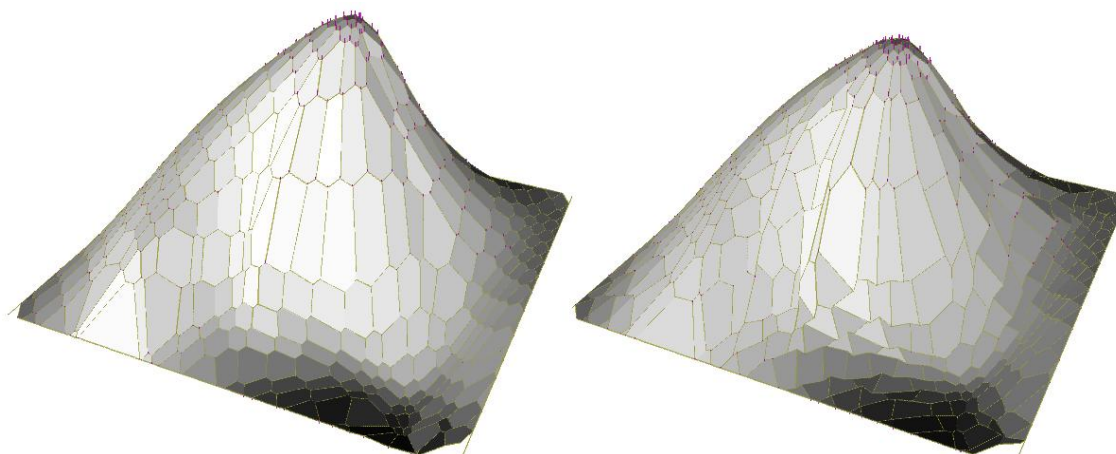


Fig 109. Comparació entre dues propostes sobre la mateixa malla hexagonal. La de l'esquerra té els angles fixats, mentre que el cas de la dreta ha deixat els seus angles lliures. Com podem veure les diferències entre els tipus de panells i de textures són notables.

Val a dir que tot i reduir-se la varietat tipològica de panells encara presenta una gran riquesa formal a la qual cal sumar-hi la flexibilitat de la funció angular. El fet de restringir el moviment dels angles a uns certs valors determinats, no impedeix que l'element es deformi seguint les tres possibles direccions per a les malles hexagonals. Darrera d'aquesta flexibilitat, que segueix present malgrat la nova restricció, hi ha una raó perquè en l'hexàgon, de la mateixa manera que en el cas del quadrat, el perímetre conté segments oposats que són paral·lels entre ells, això permet al polígon créixer en aquestes direccions amb molta facilitat. Si intentéssim fer això amb un pentàgon no ho aconseguiríem tan fàcilment perquè al no tenir els costats oposats paral·lels entre ells hauria de coordinar el creixement de diversos costats alhora per no alterar els angles interns.

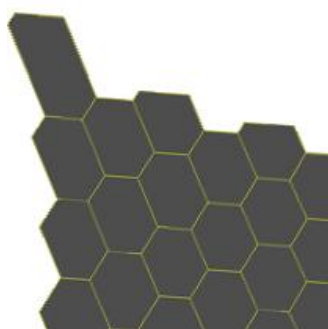


Fig 110. Exemple de diversos panells hexagonals amb els angles fixats on es pot veure com s'han deformat en les direccions de les seves rectes de contorn paral·leles, de tal manera que els angles interns no s'han modificat

En aplicar sistemes tènsils en combinació amb les funcions angulars, el sistema no produeix una contradicció tant forta com la que vàrem observar en el cas de les malles quadrades, on ens apareixien malles amb forma de flor, ja que aquesta tipologia admet les deformacions en

diagonal, cosa que permet a la malla contraure's en sentits similars als de la tensió interna. A això cal afegir les deformacions pròpies de la flexibilitat del sistema.

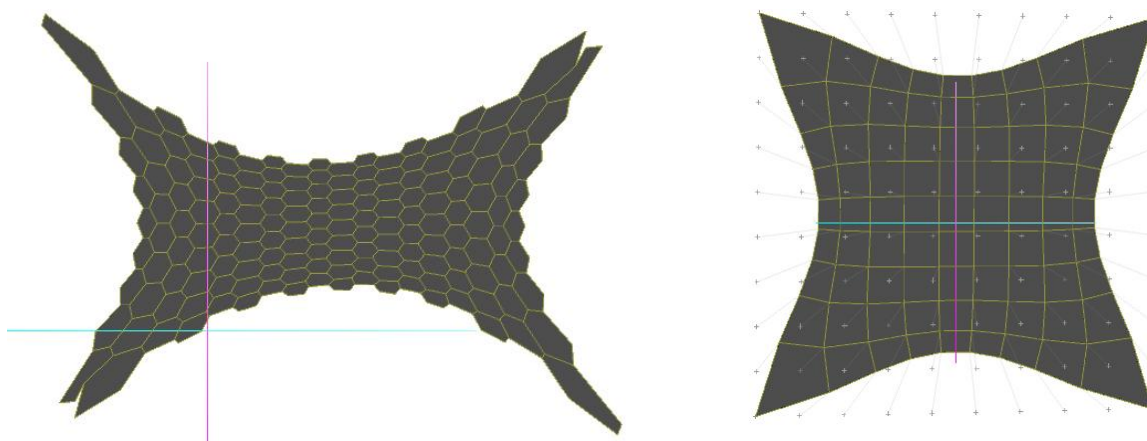


Fig 111. Comparació entre malla hexagonal amb angles fixats i malla quadrada amb angles fixats.

Així, doncs, obtenim una combinació entre les forces internes de retracció i les limitacions angulars dels panells que donen lloc a una figura que compleix totes dues condicions. Aquesta variant en tenir cordes elàstiques tendeix a una major uniformitat en els panells a la qual cal sumar la menor varietat tipològica pròpia de fixar els angles. Tot i això segueix sent més flexible que els casos de malla quadrada en permetre la deformació en diagonal i malgrat totes les limitacions encara serà capaç d'oferir variacions singulars a la malla. En general la deformació més habitual quan apliquem aquest cas és l'aparició de panells que tendeixen al hexàgon pur. Un altre cas de deformació habitual el trobem en les peces que són simplement hexàgons estirats, que acostumen a trobar-se a les zones que estan més estirades en una direcció que en una altre. A això cal afegir que la malla tendeix a deformar-se tota ella ja que com hem dit la funció angular no és absoluta i el fet d'igualar totes les longituds entra en contradicció amb la geometria que obtenim en estirar els panells en alguna direcció mantenint els angles. Finalment cal afegir alguns casos especials que tenen lloc a les vores ja que normalment són elements que suporten molta tensió i de difícil resolució.

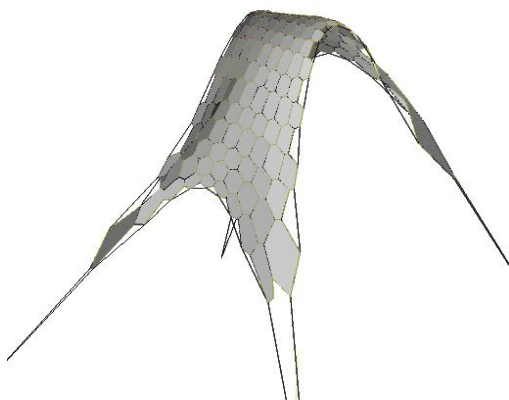


Fig 112. Malla hexagonal, formada de cordes tènsils i panells amb angles fixats. En donar molta prioritat a la funció angular obtenim un model en el qual tots els panells tenen els seus angles a 120° de manera que formen hexàgons, però aquests tenen disposicions molt diferents entre ells en combinar la capacitat de deformació segons les direccions paral·leles del contorn amb l'estat de tensions de la malla.

4.4.6 Marges d'error en panells

Els marges d'error són un factor essencial a l'hora de treballar amb panells ja que ens permeten abordar un concepte que juga un paper important durant la construcció de l'obra i que no és fàcil de tractar durant el procés de modelatge. En establir entre quins marges es pot moure un panell podem mantenir-lo pla encara els seus punts no siguin 100% plans ja que mentre es moguin dins un marge determinat podrà mantenir aquesta condició. Amb aquesta eina podem establir quina capacitat tenim per deformar una figura amb un marge d'error concret, cosa que és fonamental per tenir una idea de quines toleràncies necessitem en el moment de construir l'obra.

El procés que permet simular aquest marge té algunes propietats característiques que val la pena esmentar. Essencialment el sistema té en compte 2 conjunts de partícules en el moment de definir el pla, el primer conjunt són les partícules del model a les quals va associat el pla i que en el nostre cas es corresponen amb els vèrtex de la malla. Aquest conjunt l'anomenarem punt "reals". En el segon conjunt trobem unes partícules internes del pla, que mantenen una relació de distància respecte als punts "reals", i que són les que realment defineixen el pla en si. Aquest segon grup serien els punts "virtuals" i la distància que mantenen els punts virtuals respecte els punts reals és el marge d'error. Una de les característiques de la relació entre els punts "reals" i els punts "virtuals" del pla és que els segons mantenen una alineació amb els primers que pot estar basada en la normal del pla o la normal dels nodes segons esculli l'usuari.

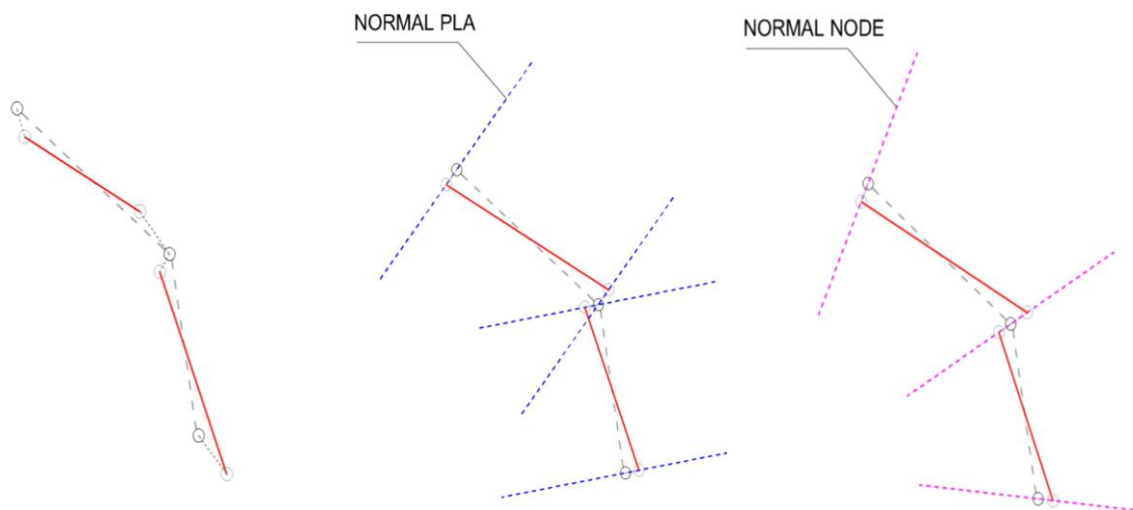


Fig 113. A la figura podem veure els tres casos d'alineació dels plans respecte els nodes. Les línies vermelles són els plans que estan definits als seus extrems per les partícules virtuals. Les partícules reals són els cercles pels quals passen les normals. En el cas de l'esquerra no hi ha cap alineació entre les partícules reals i les virtuals de manera que el marge d'error va en qualsevol direcció. En el cas del mig les partícules virtuals s'alineen amb la normal del pla passant pel punt real. Al cas de la dreta les partícules virtuals s'alineen amb la normal del node real (mitja de tots els plans que hi conflueixen) que passa per aquest.

Gràcies, doncs, a les alineacions podem controlar que els marges d'error es moguin en el sentit que ens interessa i no en qualsevol direcció. Això permet una aplicació més controlada dels mateixos i evita problemes de contorn amb els plans definits pels nodes "virtuals".

Jugant amb el marge d'error podem simular tot un conjunt de noves tipologies geomètriques relacionades amb el fet de permetre el moviment d'un pla dins una estructura general, com seria el cas de superfícies de para-sols en una façana o el moviment dels panells solars en una coberta. Per controlar la direcció del pla, es pot associar una recta als plans de manera que tots s'orientin perpendiculars a aquesta i com si fossin gira-sols aniran girant a mesura que canviem la direcció de la recta.

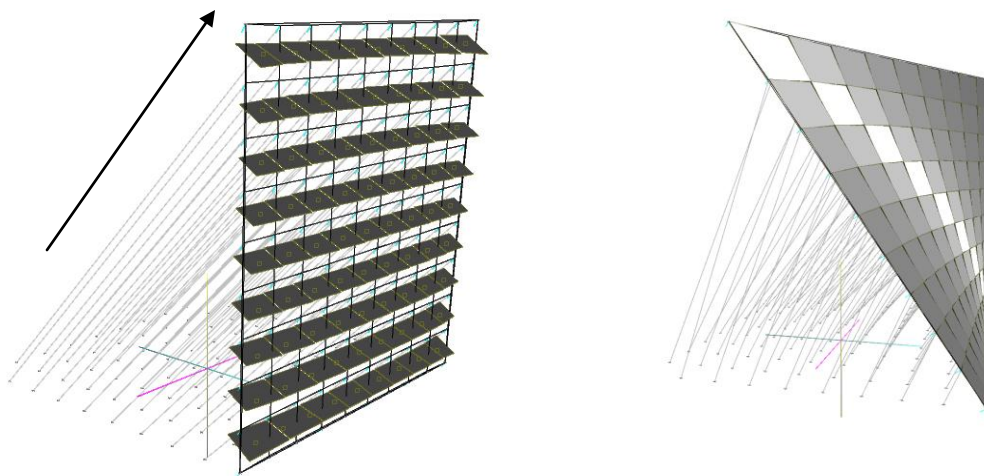


Fig 114. Cas esquerra: exemple de malla quadrada formada de panells als quals hem deixat un marge d'error prou gran com per permetre'n el moviment lliure. També hem fet servir un vector que indica la direcció de la normal de manera que podem anar orientant tots els panells segons aquest. Cas de la dreta: el mateix exemple que en el cas anterior però ara s'ha deixat un marge de només 1 centímetre i s'ha desplaçat un vèrtex formant una superfície corbada on cal donar marges.

A menor escala aquest sistema ens permet reproduir una superfície composta de panells plans que tenen petites toleràncies cadascun, en anar modificant la posició dels punts de control de la malla podem comprovar si els panells es mantenen plans o no. Augmentant i disminuint aquesta marge segons el cas podem arribar a optimitzar la geometria dels panells fins que s'adaptin a la morfologia de la malla.

4.4.7 Sistema per detectar i igualar panells segons els tipus

Aquesta és una funció experimental en la qual intento que el sistema sigui capaç de comparar un conjunt de plans segons un criteri de similitud geomètrica i després els classifiqui automàticament per grups tot igualant aquells que pertanyen al mateix grup. El nombre de tipus

el donarà l'usuari de manera que si l'usuari vol que una malla només tingui "n" tipus de panells idèntics el sistema sigui capaç automàticament i en temps real de comparar, classificar i igualar tots els panells mentre l'usuari treballa. En el funcionament d'aquest mecanisme es barregen funcions dinàmiques amb funcions purament algorísmiques i no és per tant una funció purament dinàmica, però tampoc seria possible plantejar-la sense els sistemes dinàmics. En aquest sentit seria una funció pseudo-física molt complexa.

el procés consta de diverses fases en les quals es van establint els criteris de classificació, la forma mitja de cada tipus i l'angle en el qual cada panell troba el millor encaix. Les comparacions geomètriques es realitzen en un pla en el qual es projecten els contorns dels panells. Un cop fet això es compara la desviació que presenten els uns respecte els altres, es separen pel nombre de tipus i es fa la mitja de tots els contorns de cada tipus per obtenir la forma patró. Val a dir que aquesta forma patró es va modificant en temps real de manera que el sistema iteratiu es va adaptant poc a poc al sistema que iguala els panells fins a trobar la geometria de cada tipus que millor s'adapta a la superfície proposada. El procés està ple de matisos i complicacions que afecten tant als algorismes de comparació com a les funcions dinàmiques implicades i encara està en una fase d'experimentació. Tot i això el sistema ja és funcional i amb habilitat pot donar resultats aplicables a casos reals.

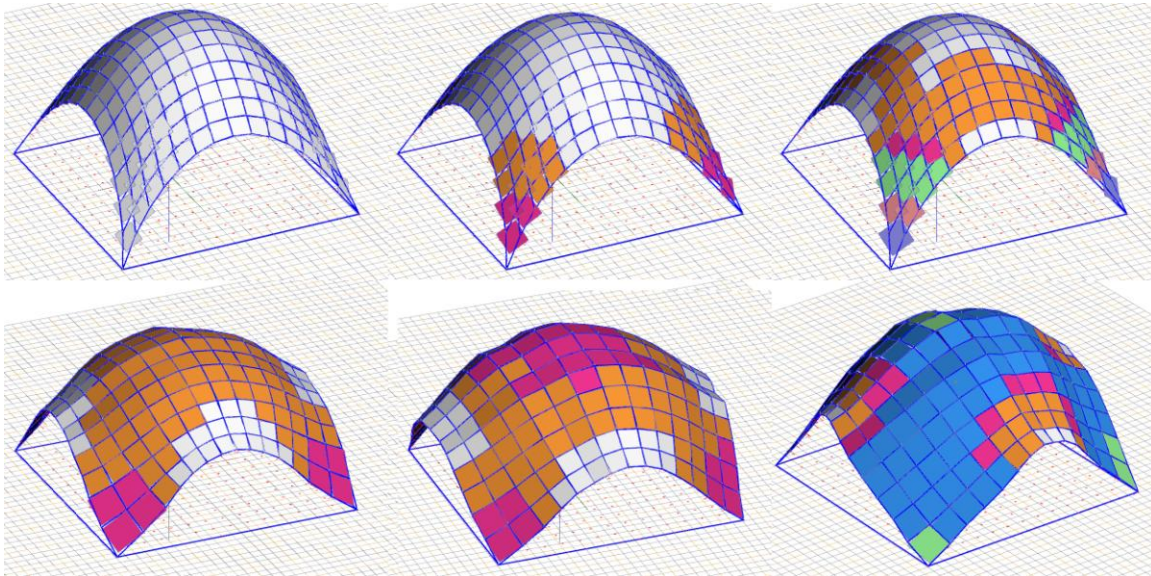


Fig 115. Tal com veiem als exemples, en forçar la planicitat i igualtat dels panells, les formes originals varien. A dalt s'han comparat malles amb 1 tipus de panells (esquerra), tres tipus (mig) i 6 tipus (dreta). A la part inferior s'ha deixat a la funció modificar lliurement el model, els resultats són canvis en la forma general que faciliten la igualtat de les peces.

4.5 Taula resum de combinació de camps de força i geometria resultant

Geometria inicial	Forces internes	Forces externes	Resultat	Comportament estructural
Polilínia	Cordes rígides	Força ascendent	Arc funicular	Heterogeni
Polilínia	Cordes elàstiques	Força ascendent	Arc funicular apuntat Longituds de corda iguals	Homogeni
NURBS	Cordes elàstiques o rígides	Força ascendent	Corba funicular precisa	-
MALLES				
Malla de qualsevol tipus	Cordes elàstiques	-	Superfície mínima.	Homogeni
Malla de qualsevol tipus	Cordes rígides	Força ascendent	Volta funicular	Heterogeni
Malla de qualsevol tipus	Cordes elàstiques	Força ascendent	Superfície mínima funicular.	Homogeni
Malla quadrada	Cordes rígides	Força ascendent	Volta funicular.	Heterogeni, Apareixen arcs funiculars dins l'estructura. Estructura molt rígida.
Malla hexagonal	Cordes rígides	Força ascendent	Volta funicular.	Heterogeni, apareixen arcs funiculars dins l'estructura. Estructura poc rígida.
Malla irregular	Cordes rígides	Força ascendent	Volta funicular degenerada.	Molt heterogeni, apareixen forats i feixos d'arcs funiculars. Estructura molt poc rígida.
Malla amb panells	Cordes rígides i plans	Força ascendent	Volta funicular. Panells complexos i irregulars. Conflictes geomètrics. Línies de tall i zones planes	Heterogeni
Malla amb panells quadrats	Cordes rígides i plans	Força ascendent	Es generen algunes tipologies de panells i s'aplanen algunes cares	Heterogeni
Malla amb panells hexagonals	Cordes rígides i plans	Força ascendent	Es generen moltes tipologies de panells que reproduïxen formes naturals	Heterogeni
Malla amb panells	Cordes elàstiques i plans	Força ascendent	Volta funicular mínima. Panells més homogènis. Línies de tall de forma funicular.	Homogeni
Malla amb panells quadrats o hexagonals	Cordes elàstiques i plans	Força ascendent	Es perd la varietat tipològica de panells	Homogeni
Malla amb panells combinats	Cordes elàstiques i plans	Força ascendent	S'obtenen el polígons purs de cada panell, uniformitzant la malla respecte l'estat inicial amorf.	Homogeni
Malla amb panells i angles fixats	Cordes rígides, plans i angulars	Força ascendent	Volta funicular. Panells molt homogènis. Feixos de rectes a les zones de major curvatura.	Heterogeni
Panells quadrats	Barres rígides, plans i angles		Volta funicular estesa	Heterogeni
Panells hexagonals	Barres rígides, plans i angles		Volta hexagonal estesa.	Heterogeni
Malla amb panells i angles fixats	Cordes elàstiques, plans i angulars	-	Volta funicular en forma de flor. Panells homogènis. Línies de tall de forma funicular.	Homogeni
Panells quadrats	Barres elàstiques plans i angles		Genera forma de flor	Homogeni
Panells hexagonals	Barres elàstiques plans i angles		Genera peces hexagonals estirades, s'adapta millor.	Homogeni

En el quadre de resultats podem veure la relació entre la geometria inicial, els camps de força interns, els externs, el resultat geomètric i el comportament estructural aproximat. El conjunt permet establir com els camps de força afecten la forma i el comportament d'un model de cara a extrapolar-ho al futur edifici. Això és important, doncs, ens permet relacionar els múltiples aspectes del disseny controlant els efectes de cada decisió en cadascun dels àmbits esmentats de manera simultània i per tant dissenyant de manera integral en base a diversos conceptes i no únicament segons la forma.

5 Estudi de disseny avançat amb camps de força

5.1 Introducció

En el moment que plantegem les possibles solucions a un problema de disseny acostumem a fer servir conceptes, idees o fins i tot factors objectius que poden tenir una traducció a nivell dinàmic en forma de camp de força. Val la pena, doncs, plantejar casos, encara que siguin esquemàtics en els quals puguem posar en pràctica aquest criteri per veure quins resultats dóna. El programa disposa de diferents eines que permeten generar forces d'atracció o repulsió que alterin la forma natural d'una estructura. Aplicant aquestes funcions al disseny podem entendre que un flux de persones pot ser tractat com una recta o corba NURBS que atrau els vèrtex d'una malla, o la força del vent com una força que generà una pressió sobre els panells. En fer això veiem com la malla lluita per equilibrar les forces internes que la defineixen amb les forces externes que l'estan empenyent i finalment ofereix un resultat que és fruit de l'equilibri de tots els camps entre si. Hom podria dir que el resultat sembla un disseny arbitrari, però no ho és en el moment que l'entendem com a resultat lògic d'un procés d'equilibri de forces, en el qual cada força es correspon a un concepte o un criteri específic. Es pot discutir que el criteri sigui encertat o que l'acció dinàmica que el representa sigui adequada, però la solució segueix sempre una lògica raonable que podem exposar i controlar numèricament.

De la varietat de casos que podem simular amb aquest sistema n'apareixen alguns molt immediats que donen lloc a models característics basats en principis compositius comuns. Recordem que en els sistemes dinàmics un model es basa en generar una estructura de relacions de camps de força que deformaran un model. Aquests camps de força seran, doncs, els principis compositius de la figura. A continuació en plantejo tres casos generals que són:

1. Simular l'acció de forces generals com la del vent o la gravetat.
2. Generar fluxos entesos com una recta o una NURBS que atrau a una malla.
3. Generar punts d'atracció entesos com partícules que atrauen a un conjunt.

De tots ells hi han diferents alternatives ja que aquest llistat enumera conjunts de casuístiques que es poden generar amb sistemes dinàmics. El que farem, doncs, serà mostrar vies de disseny amb les quals es poden generar famílies o tipologies de models que responen a diferents tipus de problemes o de plantejaments del projecte.

5.1.1 Procediment general de modelatge

A l'hora de generar un model quasi sempre es parteix del mateix esquema i comença amb el plantejament d'una malla inicial amb unes condicions de partida que nosaltres li indiquem en el moment de crear-la. Fixem-nos que sempre partim d'una estructura prèviament definida, la qual transformarem fins a obtenir un model que ens interessi, en canvi els programes de CAD quasi sempre parteixen d'elements geomètrics bàsics com la línia, el punt o el pla. Encara que el programa dinàmic també permet aquesta mena d'aproximació al modelatge, quan es fa servir molt sovint es tendeix a deixar de banda aquesta estratègia en favor de l'ús de sistemes prèviament definits els quals es van deformant fins a obtenir un resultat concret. És, doncs, una alternativa als sistemes actuals que també s'ha insinuat en els sistemes BIM on treballem amb elements prèviament configurats estalviant gran part de la feina que requereix dibuixar-los.

Un cop hem generat el model de base, normalment una malla o un cub mallat, es genera un element o elements actius que exerciran una acció sobre l'objecte de base deformant-lo. Aquests elements actius poden ser tant una força general com un objecte que exerceixi una acció, tot depèn del plantejament que fem. En posar tots aquest elements en joc obtindrem un primer model, molt esquemàtic. En aquest punt ens caldrà començar a treballar sobre les forces establint diferents estats d'equilibri i comprovant quin efecte tenen sobre el model. En aquest punt hem d'intentar obtenir un element el més similar possible a la nostra idea de tal manera que resolgui la major part de problemes possible.

Un cop hem finalitzat la primera fase passem a la fase d'optimització en la qual farem entrar en el joc forces que simulin aspectes constructius o geomètrics que vulguem retenir i que no formen tant part de la nostra idea sinó que són requisits imprescindibles de cara a la viabilitat del projecte com per exemple, que les cares siguin planes, que les peces siguin regulars o d'uns tipus determinats, etc. Aquest procés és generalment un procés difícil en el qual cal tenir una certa habilitat i experiència per poder fer-lo servir correctament. En aquest sentit les optimitzacions que hem realitzat quasi sempre es basen en regularitzar o jugar amb els panells de les malles, encara que es podrien introduir altres criteris més generals de treball com mantenir certes distàncies a l'indes, retenir l'altura d'algun dels objectes, etc.

5.1.2 Efectes compositius

Per estudiar cadascun d'aquests mecanismes es poden analitzar les propietats de composició i pràctiques que confereixen al model un cop els hem aplicat. En alguns casos els resultats tendiran a generar la sensació de moviment en una direcció, en d'altres simularan estar en tensió o també que penguin d'elements virtuals deixant entendre la presència de coses que no hi són.

Al mateix temps que la percepció en l'observador varia d'un mètode en un altre, apareixen també alguns aspectes estructurals que el model hereta del mecanisme de control que haguem fet servir conferint propietats mecàniques generals que poden ser del nostre interès. No oblidem però que no està plantejat com un programa de càlcul d'estructures en temps real i que els resultats són purament indicatius i en cap cas precisos. Tot i això aquesta possibilitat està plantejada de cara al futur (poder comprovar l'estructura del model en temps real).

5.2 Malles i fluxos

De cara a la simulació de fluxos hi ha dos elements geomètrics que es poden fer servir per simular-ne la presència, que serien les rectes i les corbes NURBS. Tots dos elements tenen funcions específiques que permeten vincular-les als vèrtex de la malla i per tant es poden aplicar a la generació de models basats en la presència de fluxos. Aquesta però no és la única estratègia ja que també podríem entendre els fluxos com una força general que empenya una part del model en una direcció determinada, en aquest cas obtindríem una estructura que es deformaria en la direcció del flux. Per tant ja veiem que hi ha diverses maneres d'entendre i simular el mateix fenomen i totes elles poden donar resultats amb un cert interès formal. En primer lloc aplicaré una simulació en que els fluxos s'entendran com a rectes, d'aquesta manera començaré pel cas més senzill i poc a poc anirem complicant el procés en afegir corbes i camps de força generals.

5.2.1 Recorreguts rectes

La trajectòria més simple que hi ha és la recta, un flux de gent caminant per un carrer normalment es mouen en línia recta, els cotxes per una autovia es mouen normalment sobre una recta i els trens també, fins i tot els avions normalment es mouen en línia recta. Per establir un disseny en funció d'un recorregut lineal podem aplicar una funció vectorial, que com hem vist, atrau una sèrie de partícules cap a una recta i les manté sobre la seva direcció. Considerant que la recta és un flux de persones que passegen, cotxes o trens, podem fer que una estructura sencera es vegi afectada per aquest flux i es deformi segons la direcció del recorregut. Normalment, per aquesta mena de casos la malla quadrada és una estructura senzilla i resistent que s'adapta amb agilitat a les condicions normalment difícils que les forces li generen.

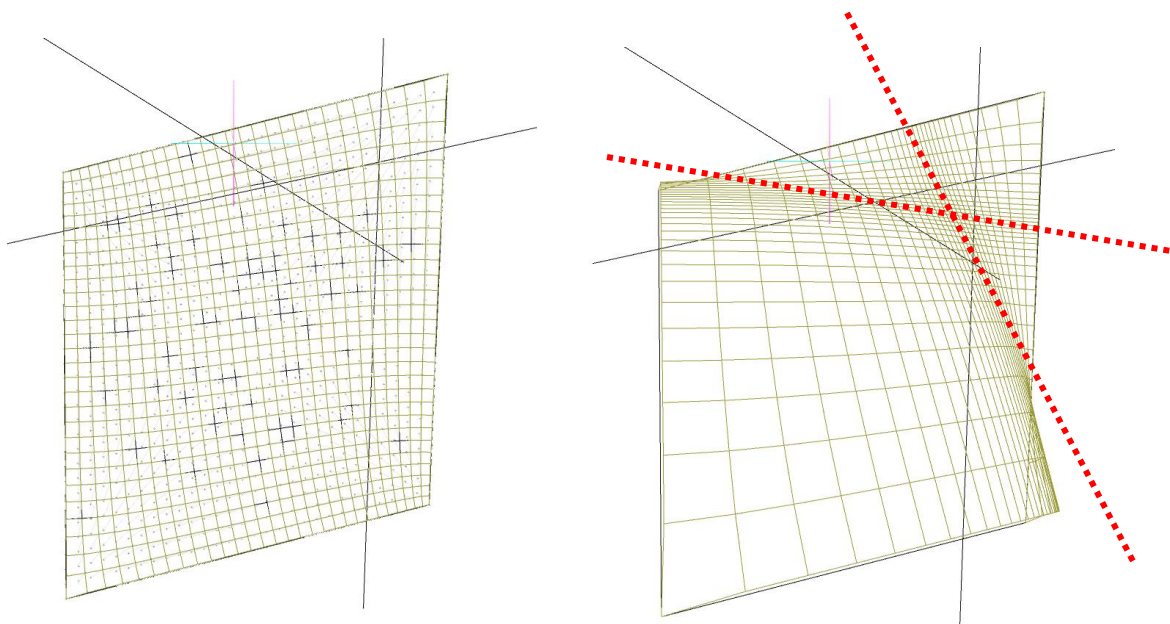


Fig 116. Estat inicial (esquerra) en el qual hem generat una sèrie de recorreguts representats com a línies i una malla base composta per una quadricula de 30 x 30 quadrats. A la dreta veiem les primeres transformacions en les quals ja estan actuant les forces d'atracció sobre la malla. Si ens hi fixem veurem que la malla situa la major densitat de quadrats a les posicions entre mig dels recorreguts. Això és deu al fet de que és en aquestes posicions en les quals les forces d'atracció dels diferents recorreguts entren en equilibri

El primer que farem, doncs, serà generar una malla de cordes elàstiques i de cel·la quadrada. Aquesta malla ha de ser elàstica perquè es deformarà moltes vegades durant el procés de generació del model i per tant ha de ser capaç d'assumir i reorganitzar les deformacions. Després podem generar dues o tres rectes que simulin la presència de fluxos lineals. Fet això vincularem els punts de la malla a les rectes de manera que s'estableixi una relació entre ells. Per tal de donar una mica més de volum a la malla cal afegir una força ascendent, tal com faríem si apliquem el principi de la catenària inversa, llavors la nostra malla començarà a ascendir i a generar una volta funicular. Un cop preparats els elements bàsics podrem iniciar la simulació augmentant la intensitat de l'atracció cap a les rectes. El conjunt es transformarà en una construcció peculiar en què tots els principis es combinen, i segons la intensitat de cadascun dels camps el model tendirà a apropar-se més o menys a les rutes enteses com línies. Altres forces que també poden intervenir en l'elaboració del model, encara que de forma més subliminal, serien les forces del pla, si és que hi hem posat panells, que tendeixen a fer totes les cares planes. Aquestes forces les podem deixar actuar de manera preponderant al final, un cop hem obtingut un disseny que més o menys ens convenci perquè vagin ajustant i modificant el model de cara a acomplir les condicions preestablertes de planicitat.

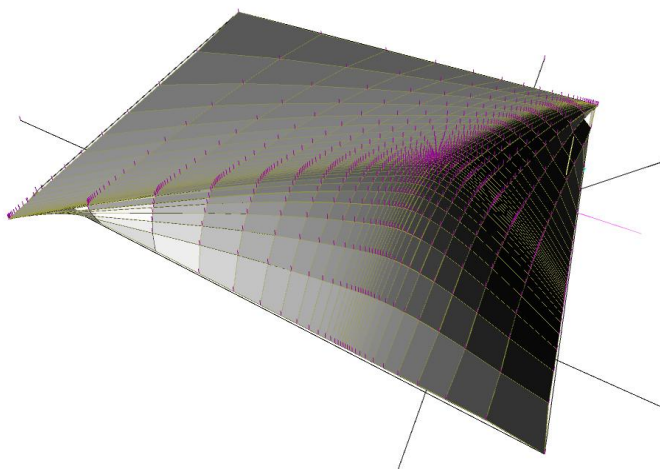


Fig 117. Element volumètric obtingut directament a partir de l'aixecament de la malla un cop que ja estan actuant les forces d'atracció a la recta.

Els primers models que obtenim acostumen a ser esquemes relativament toscos en els quals les tendències generals es comencen a insinuar. En aquest punt el sistema està encara molt poc definit i és el moment ideal per experimentar amb diferents combinacions que explorin les possibles solucions al disseny proposat. La manera més habitual de començar a modificar el model consisteix en alterar les intensitats dels camps que actuen en ell per variar-ne la geometria. Cal tenir en compte que per poder generar el model inicial el primer que hem hagut de fer es regular les diferents accions perquè actuïn mantenint un equilibri entre elles en el qual el model no es desvirtuï. Regulant les accions que vinculen les rectes amb la malla podrem accentuar o diluir la presència dels recorreguts a l'estructura tot modificant un dial. També podrem variar les vores i fer-les més arquejades o més rectes modificant la intensitat de les forces vectorials que les mantenen alineades.

Una altra manera de treballar amb sistemes dinàmics consisteix en modificar directament la geometria del model i observar-ne els canvis en temps real. Per exemple podem canviar la manera com una força afecta a la malla modificant la direcció i la posició d'algun dels fluxos que exerceixen una atracció sobre ella. En fer això canviem l'orientació i la posició de les forces que actuen sobre el model i aquest respondrà buscant una nova configuració amb la qual pugui seguir mantenint el conjunt en equilibri. Aquesta mena de modificacions són potser la part més interessant de tot el procés de treball dinàmic ja que de nou, amb un esforç mínim, explores una gran quantitat de propostes sobre un mateix tema i quasi tant important com el que proves és tot allò que et va suggerint mentre ho fas. En el cas de la figura, en modificar la posició d'una de les rectes que simula un flux, ens apareix un porxo que surt de la malla i intenta envoltar el recorregut tot abraçant-lo des de dalt. Aquest gest completament espontani, i perfectament lògic des d'un punt de vista compositiu, està trobant recursos que els arquitectes ja fa molts segles que fan servir i que han demostrat la seva funcionalitat. Tot i això no és un element directament

construïble i amb això cal ser curós perquè encara estariem treballant més amb un esbós tridimensional que no pas amb una proposta acabada.

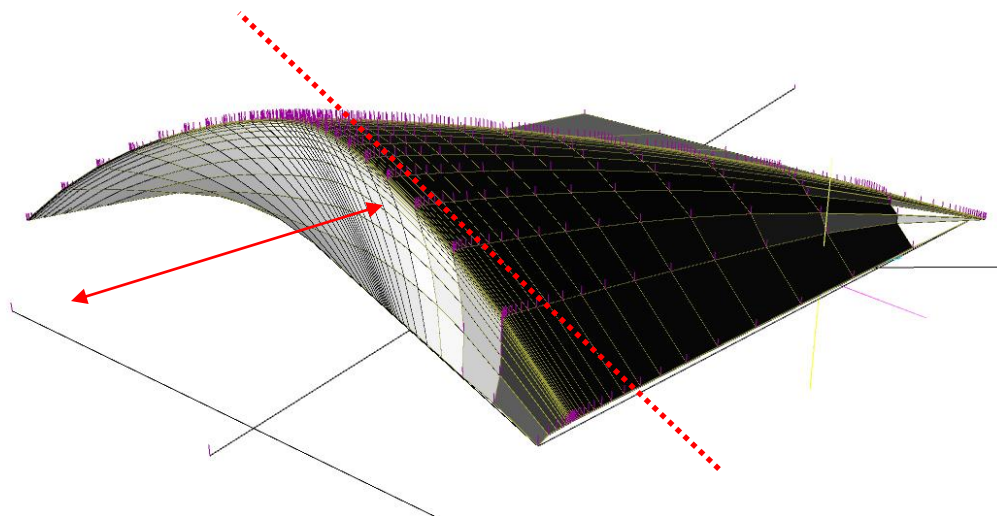


Fig 118. Modificació de les rutes que donaven forma al model anterior. Com podem veure tot el model s'ha modificat per adaptar-se a les noves condicions i ha format una volta exterior de manera espontània.

Un cop que el disseny global ens satisfà podem passar a controlar aspectes més subtils del mateix, com seria la planicitat de les cares, els angles a les vores dels panells o altres condicions geomètriques que considerem oportunes. Aquest procés d'optimització és essencial de cara a analitzar, a l'engròs, la viabilitat de la proposta en el mateix moment de dissenyar-la ja que gràcies al procés d'anàlisi podem descartar o escollir aquelles opcions que donin millors resultats per a una sèrie de condicions geomètriques de caire constructiu o estructural. Per mitja d'aquest mecanisme el sistema busca la solució més òptima seguint les directrius que li haguem donat de cara a complir alguna condició geomètrica que sigui preponderant. Aquest procés té lloc en dues fases, una primera en la qual el model es transforma de manera ràpida a les condicions que li haguem donat, i una segona en la qual el model va patint transformacions subliminals que no s'aprecien directament però que en qüestió de minuts tenen uns efectes notables sobre el conjunt de la figura. Aquesta segona fase ofereix normalment solucions molt més adequades que la primera ja que són el fruit de moltes iteracions en les quals els canvis són molt petits i per tant molt precisos. Recordem que els sistemes iteratius són mecanismes que treballen per mitja de la discretització, com més petits són els canvis, més precisió tenen els resultats. Aquests processos subliminals són, doncs, essencials de cara a l'optimització ja que fan ús d'un recurs molt important dels sistemes dinàmics i és que el model està contínuament sent operat i per tant està aprofitant part de la capacitat de computació del sistema per millorar-lo.

En el cas que ens concerneix, un cop que ja donem el model per vàlid, hem passat a optimitzar-lo de cara a l'acompliment d'una condició constructiva com per exemple la planicitat de les cares. En aquest cas el sistema ha estat capaç d'aplanar tots els panells de la figura sense excessives dificultats i el més important és que no ha hagut de modificar el disseny general sinó que ha realitzat canvis quasi imperceptibles donant a entendre que la forma és molt adequada de cara a la fabricació amb peces planes. En aquest punt ja sabem que el model, o aquest tipus de models, responen favorablement a les condicions que hem imposat i per tant podem seguir avançant per aquesta línia. En aquest sentit també val la pena visualitzar en forma de colors la manera com està treballant el conjunt per fer-nos una idea del que està passant internament. En general és molt útil visualitzar les tensions produïdes als plans i així detectar ràpidament les zones de conflicte en les quals hi ha més problemes de planicitat.

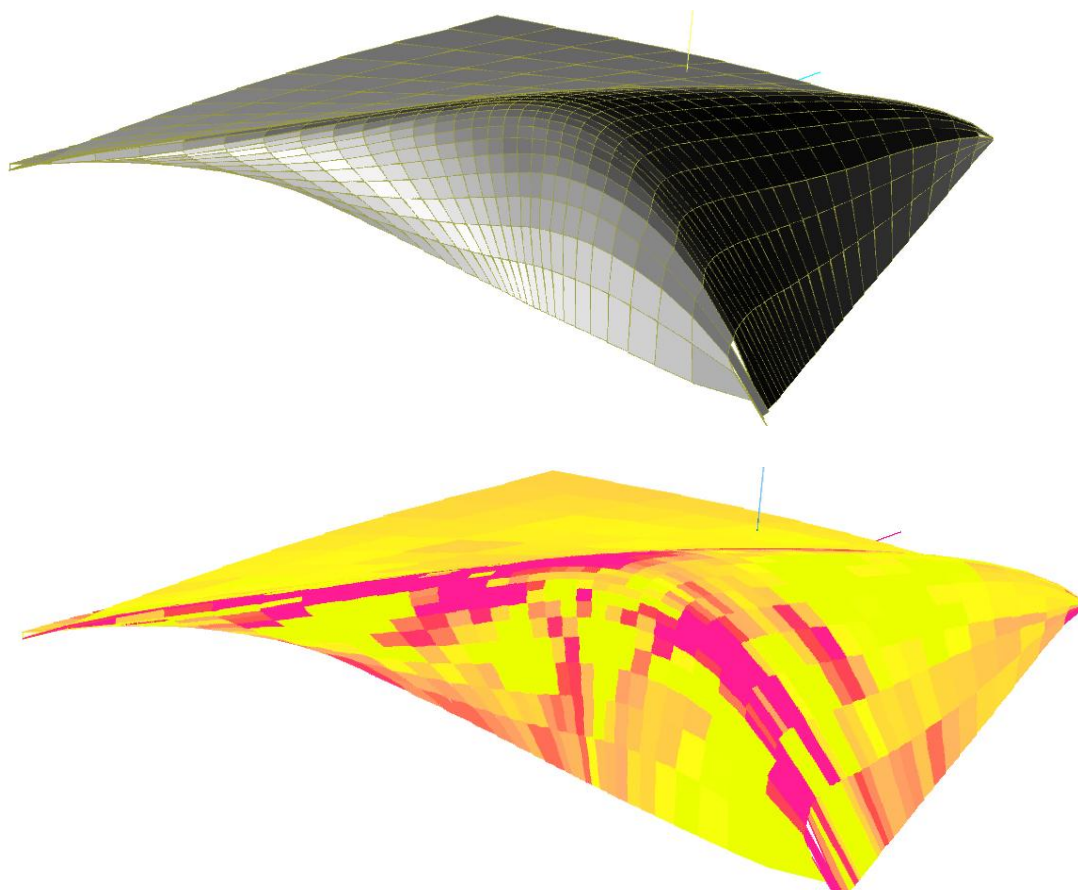


Fig 119. Model optimitzat en el qual s'ha donat un marge de 3 cm als panells i s'ha accentuat la funció de planicitat. Tal i com es pot veure en el mapa de desviacions del pla, les zones més conflictives es troben a les vores i a les superfícies alabejades.

5.2.2 Propietats de composició

De cara a la percepció que l'usuari pugui tenir de seguida veiem que el moviment apareix expressat com una ona que es vessa cap a un canto tal com si volgués engolir els elements que es troben en aquella zona. Aquest efecte dóna a entendre que hi ha una zona d'entrada i un altre de sortida i per tant ens està induint a un recorregut a partir del disseny dinàmic tant a dins com a fora de l'edifici. Aquesta forma, doncs, es relaciona amb l'entorn influenciant-lo. Un aspecte menys evident a primera vista però que pot ser molt important en alguns casos és que aquesta mena de disseny pot induir a entrar a tots aquells vianants que passin pel costat de la "ona" en donar la percepció de que la via tendeix naturalment a quedar engolida per la coberta d'aquest. Sense necessitat, doncs, d'envair la via, s'està fent entrar el flux a dins de l'edifici. En aquest sentit seria molt interessant veure quin efecte té sobre un conjunt de persones la sensació de que l'edifici els està engolint, si això els atrau o els allunya del mateix o si els indueix a entrar al seu interior. És probable que el causar una sensació tant clara de moviment tingui un efecte en un flux que és perceptiu (el flux humà) i aquest efecte no el podem predir fins que no hi hagi un nombre mínim d'edificis amb aquesta tipologia construïts. En qualsevol cas aquest efecte només es pot aconseguir en emprar sistemes dinàmics de modelatge, ja que és quasi impossible de reproduir manualment.

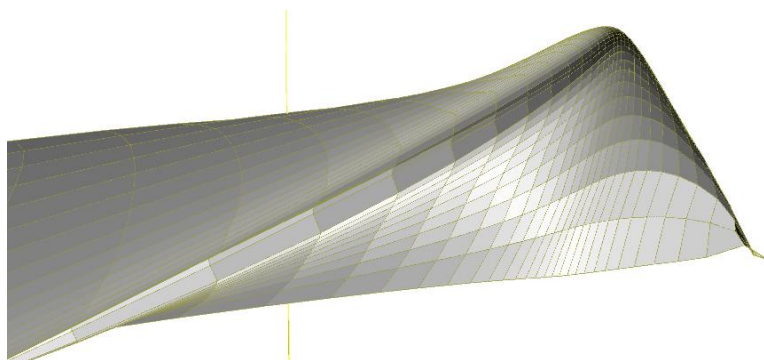


Fig 120. Vora del lateral del voladís. Fixem-nos en la acumulació de panells just abans d'arribar a la vora i com el sistema ha resolt el problema en la vora mateixa afegint una tira de panells plans. Aquesta tira corre per tota la vora fins a reintegrar-se a l'estructura al final de la corba.

Observant els resultats també podem treure conclusions que ens poden ser útils a nivell constructiu. En el cas present podem veure com el sistema ha generat algunes solucions relativament hàbils de cara a facilitar la planicitat dels panells a les zones més conflictives. Si ens fixem en la vora del voladís, que és un punt on hi ha molts conflictes geomètrics entre la planicitat de les cares i la curvatura de la superfície, el sistema ha donat una solució en la qual es genera una franja de panells plans i allargats que remata l'extrem del voladís i a més facilita la

connexió amb els panells que vénen de la resta de l'estructura. Aquesta solució emergeix de manera espontània i és fruit del procés de transformació subliminal abans esmentat. El problema però és que cal estar atent al model perquè de vegades aquestes solucions tenen lloc durant un període de temps curt per passar a evolucionar més endavant a una altra solució que no sempre és millor a nivell conceptual.

5.2.3 Recorreguts amb corbes NURBS

No tots els recorreguts són tant senzills com la línia recta, encara que aquesta sigui la regla general hi ha molt casos en els quals a l'arquitecte li interessa que el recorregut passi per diferents punts que no es troben necessàriament alineats. Per aquests casos cal establir un mecanisme que pugui simular aquesta mena de recorreguts fent-los participar com objectes actius del model. En aquest cas el procés comença de manera anàloga a l'anterior, primer de tot generarem una malla que ha de tenir una certa densitat, a aquesta li donarem un cert volum fent servir una força ascendent, igual que abans. En fer això ja tenim un element volumètric de base a partir del qual treballar i que serà sobre el que aplicarem les forces d'atracció.

Ara podem passar a definir l'objecte que ens descriurà el recorregut o el flux que volem simular. Per fer-ho generarem un seguit de punts significatius de la ruta i hi farem passar una corba NURBS per tots ells de manera que descrigui una forma sinuosa que els enllaci. Tinguem en compte que aquesta corba no té necessàriament que estar sobre un pla, perquè també pot ser un element tridimensional a l'espai que generi un recorregut en diferents altures. Fet això ens valdrem de la funció d'atracció que vincula una corba NURBS amb una o més partícules per fer-la participar en el conjunt del model tot atraient els vèrtex de la malla.

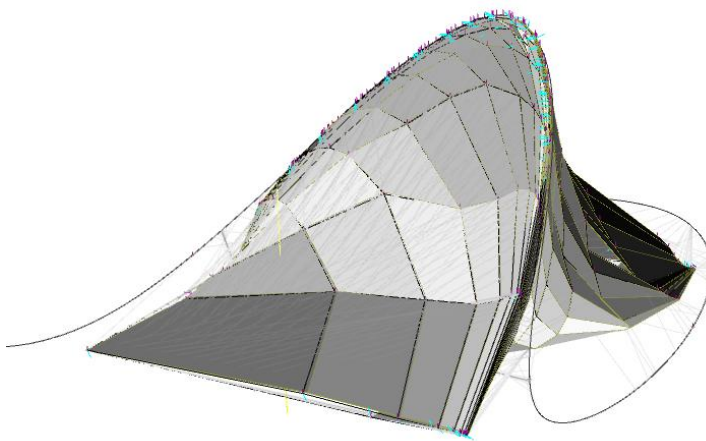


Fig 121. Un cop apliquem la funció d'atracció entre la corba i la malla obtenim una deformació brusca. Falta encara establir un equilibri de forces ja que la intensitat de la força d'atracció a la NURBS és tant forta que supera a totes les altres desvirtuant així el nostre model.

Un cop hem construït aquest model inicial li donarem intensitat a la força d'atracció entre els dos elements principals de manera que obtinguem un primer estat que encara serà molt esquemàtic però que ja ens dóna una idea de la idea del disseny. Inicialment al no haver treballat l'equilibri de les forces veurem que la forma de la malla queda completament anul·lada per la força d'atracció cap a la corba, de manera que perd la seva forma original i ofereix un resultat certament inviable. El següent pas serà establir un equilibri de forces en el qual la malla no perdi completament la seva forma, aquest és un procés habitual i essencial en treballar amb elements dinàmics. La major part del modelatge es realitza d'aquesta manera, ja que la geometria cal manipular-la indirectament a través de les forces aconseguint diferents estats d'equilibri entre totes les accions que actuen en el model, ja sigui la força general ascendent, les forces internes de la malla o la força d'atracció cap a la NURBS. Aquest procés, amb el temps i l'experiència, es torna molt intuïtiu però no monòton ja que els resultats si bé són uniformes en termes generals, més en concret sempre et sorprenen en major o menor mesura. Així, doncs, per equilibrar tot el conjunt ens caldrà modificar les intensitats generals i les particulars de les diferents accions que van deformant i millorant el nostre model fins arribar a un resultat parcial que ens convenci suficientment com per desar-lo. També haurem de vigilar de no excedir els límits del programa ja que pot donar-se el cas que les reaccions siguin superiors a les accions i el sistema comenci a guanyar energia sense control, cosa que resultaria en la desintegració del model. Aquest fet està explicat a l'apartat sobre "el problema de la conservació de l'energia" del capítol 6 i és important tenir-lo clar en treballar amb sistemes dinàmics ja que no és estrany que en algun moment ens passi algun fenomen relacionat amb aquest problema. Generalment es soluciona baixant d'intensitat la força causant del descontrol o bé augmentant la fricció general.

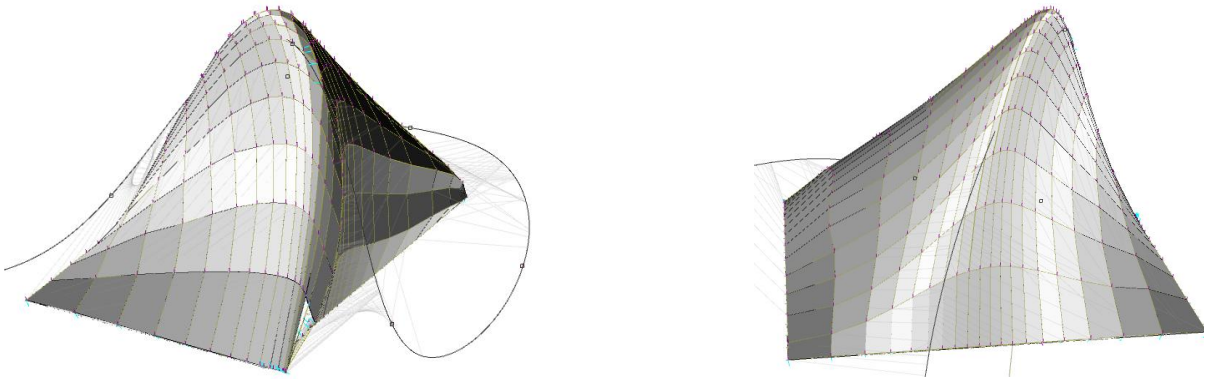


Fig 122. El mateix model de la figura anterior un cop equilibrades les accions entre les forces internes de la malla i la corba. Les dues imatges corresponen a una vista frontal (esquerra) i una vista anterior (dreta) de la figura resultant. Observis que la funció de planicitat comença a actuar en el model generant un plec a la figura esquerra.

Aplicant aquests criteris ràpidament obtindrem una figura molt més suau que l'anterior on les forces mantenen una relació més equilibrada entre elles. Per obtenir aquest primer resultat ha calgut regular i reduir la intensitat d'atracció de la corba NURBS respecte les forces internes de la malla i la força ascendent. També s'ha reduït la intensitat general de totes les forces de manera que el càlcul es torni més precís. Per acabar d'optimitzar el nostre model podem fer que tots els panells siguin plans o que es moguin dins un marge de planicitat establert per nosaltres. Aquest procés és diferent per a cada disseny i pot donar resultats molt diversos. A diferència de l'exemple anterior en el qual el model no patia cap modificació important, en deixar actuar el procés durant uns 3 minuts, sí que s'observen transformacions significatives que han donat lloc a una forma lleugerament diferent de l'original. El primer que veiem és l'aparició de línies de tall a l'estructura que separen clarament unes zones de les altres. Aquestes línies apareixen espontàniament en intentar forçar la planicitat de les cares i ajuden a fer tot el disseny més òptim per a la seva fabricació amb peces planes. Aquestes deformacions de vegades poden ser tant accentuades que pràcticament facin una proposta nova. En aquests casos caldria replantejar de nou el model inicial, doncs, ha quedat palès que no era compatible amb la condició de planicitat dels panells. També podem veure l'aparició d'esclatxes entre els panells que són precisament el resultat lògic del marge d'error que li hem donat als panells perquè pugin adaptar-se a les condicions de la superfície. En conjunt, doncs, ha aparegut un element geomètricament més proper a la realitat constructiva, encara que no sigui ni molt menys real.

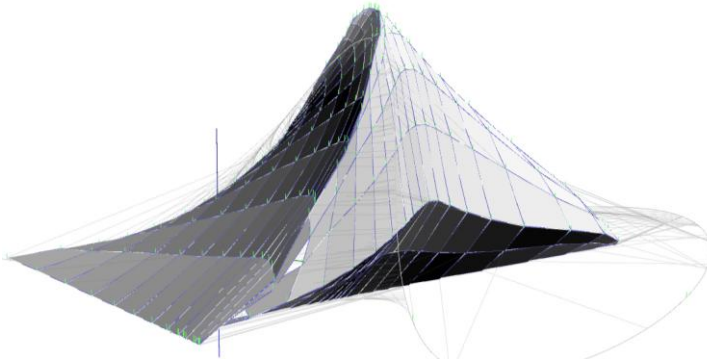


Fig 123. Resultat de la figura un cop aplanats tots els panells amb un criteri màxim de desviació de 5 cm

5.2.4 Propietats de composició

Un exercici interessant que podem fer un cop hem obtingut un resultat consisteix en analitzar cadascun dels elements que han donat peu a la figura. Aquesta informació que normalment queda en forma d'esbós conceptual fet a mà, ara es pot presentar com a part integrant del procés de modelatge, amb dades mètriques i criteris objectius. En el nostre cas l'element principal que ha donat forma a la proposta ha estat la funció que relaciona la corba NURBS amb la malla elàstica. visualitzar aquesta relació ens pot permetre entendre millor la idea subjacent en el nostre disseny i com aquesta relació ha condicionat tot el model. En observar com els vèrtex

han quedat adherits a la corba per mitja de línies de força un visualitza ràpidament el procés de dinàmic que ha donat peu a la forma observada. També es poden ressaltar altres aspectes com la disposició dels plans i els marges que deixen entre ells o com és l'interior de l'espai proposat. A continuació s'exposen un seguit de figures que mostren diversos aspectes del model que no són visibles en el resultat final però que són importants si volem transmetre les idees que hi ha darrera de la nostra proposta.

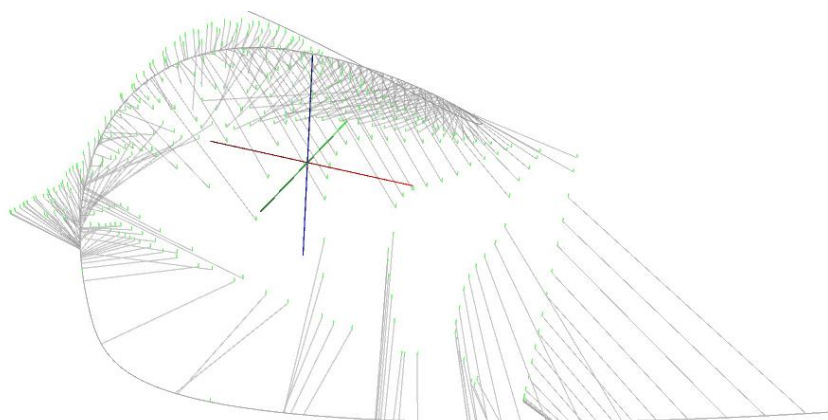


Fig 124. Esquema de la corba NURBS que deformarà la malla al seu voltant. D'ella surten tots de fils que són les diferents connexions amb els punts de la malla.

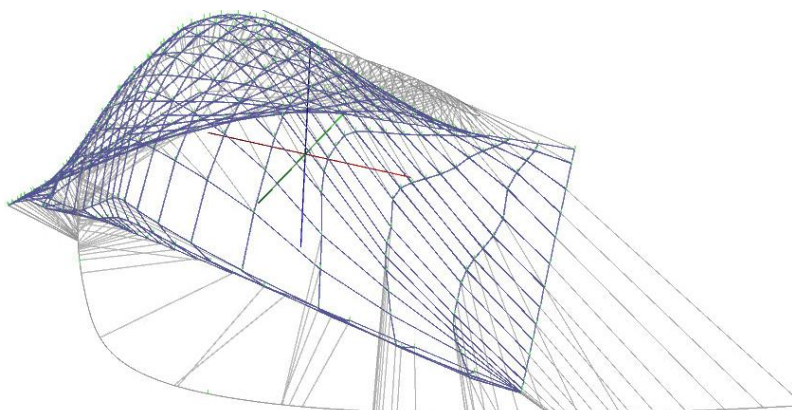


Fig 125. A continuació es pot veure la malla que s'ha generat com a resultat de dues accions principals, l'atracció cap a la NURBS i una força ascendent en sentit contrari a la gravetat.

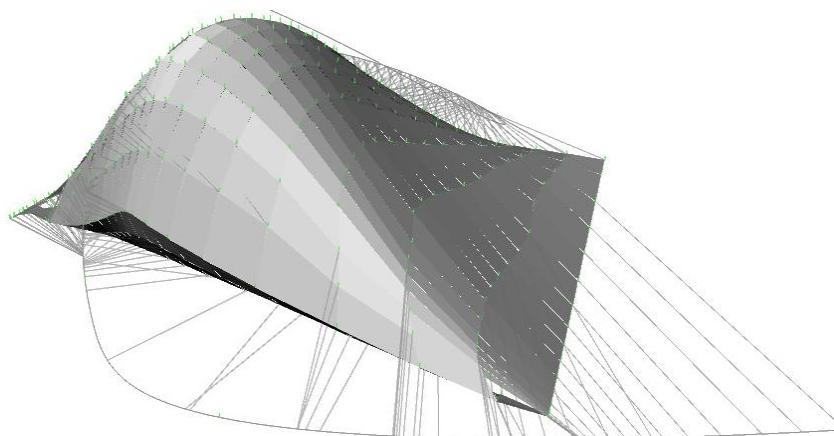


Fig 126. Esquema de tots els panells plans que conformen la pell de l'estructura. Es poden notar les juntes de 5 cm que s'han deixat per tal de facilitar la planicitat dels panells.

Com podem veure el recorregut de la corba ha estirat tota l'estructura i li ha donat la forma que la caracteritza. Cal fer notar que el resultat guarda una notable similitud amb una tenda de campanya, que precisament acostuma a funcionar de manera similar en tenir els diferents punts d'una tela (malla) estirats per uns tensors (unions amb la corba NURBS). El conjunt, doncs, està sotmès a lleis similars i per això dóna un resultat similar.

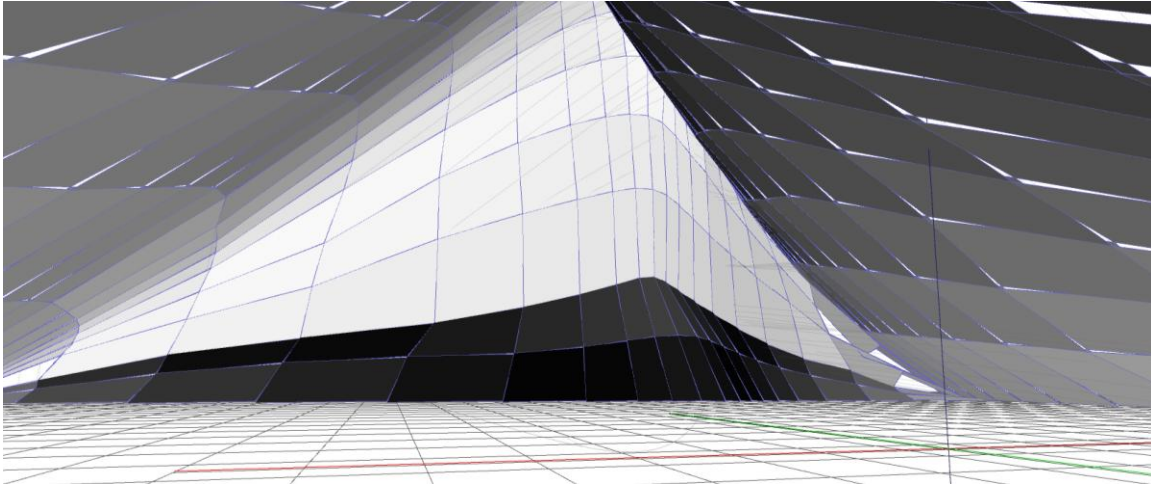


Fig 127. Visió interior de l'espai obtingut amb aquest procediment. Es pot observar amb molta claredat els marges d'error que se li han deixat als panells i com afecten a la percepció interior.

El resultat també està creant uns espais interns i podem comprovar com serà l'efecte de l'espectador en recórrer l'interior. En realitat la nostra corba, en estar situada a diferents altures, no dibuixa directament un recorregut en el terra sinó que descriu el que seria un recorregut en altura. Des del terra podem sentir aquest moviment de tota l'estructura i la sensació de que es desplaça seguint una corba a l'espai. Encara que es tracti d'un esquema molt senzill ja podem intuir que l'efecte primari serà aquest, i és possible que afinant el procés es puguin obtenir impressions molt més subtils que les aquí proposades.

5.3 Malles i partícules

En arquitectura establir un focus d'atenció juga un paper central en el criteri de disseny ja que els recorreguts acostumen a dirigir-se o a moure's al voltant d'un element central. A l'hora de plantejar propostes cal tenir aquest concepte molt clar ja que quasi sempre trobarem algun element que sobresurt per sobre dels altres i que ens estructurarà el projecte. Aquest fenomen afecta tant a nivell funcional com compositiu i és essencial de cara a generar elements que siguin coherents amb el seu entorn i que s'adaptin correctament a funcions determinades.

Per integrar aquest element al sistema de modelatge basat en simulacions físiques hi ha dues aproximacions bàsiques, la primera consisteix en actuar per exclusió i l'altra per atracció. El primer cas es basa en generar una àrea d'exclusió al voltant de les partícules de manera que no s'apropin a menys d'una certa distància de les altres, aquesta distància acostuma a ser esfèrica i a estar definida per un radi. Amb aquest mètode es pot generar un espai dins una malla en generar una partícula de radi molt gran que exclogui les partícules de la malla generant un bony. El segon sistema consisteix en l'efecte contrari, a partir d'una força d'atracció atraïem els vèrtexs d'una malla cap a una partícula, produint així una deformació.

5.3.1 Sistema per focus d'exclusió

En aquest punt hi ha diverses estratègies que podem seguir per fer actuar les forces puntuals com a motors de disseny. El primer sistema que farem servir es basa en generar un radi mínim al voltant dels focus d'atenció al interior del qual no puguin entrar altres partícules. Això genera una zona d'exclusió al voltant d'un focus que en preserva el volum buit independentment de les transformacions que pugui patir el conjunt i que ens permetrà significar una sèrie de zones per sobre de les altres. A continuació generem una malla relativament densa, de 35 x 35 vèrtexs, de manera que tingui més facilitat per adaptar-se als contorns que es formaran i assigno una força d'atracció que relacioni els punts de la malla amb els focus d'atenció de l'esquema funcional. L'objectiu d'aquesta vinculació no és atraure els punts de la malla cap als punts de l'esquema sinó únicament posar-los en relació de manera que l'àrea d'exclusió al voltant dels mateixos sigui efectiva, ja que si dos punts no es relacionen simplement s'ignoraran. A continuació deixarem que la malla caigui sobre els focus de manera que ressaltin els volums al voltant seu. El resultat és relativament trivial i podem veure com s'ha sobreposat la malla sobre les zones remarcades.

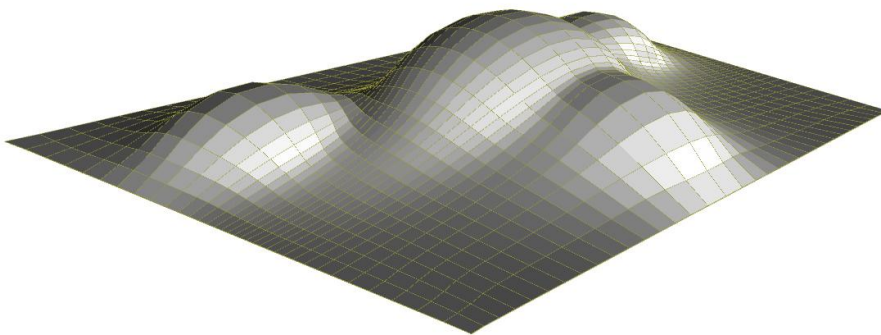


Fig 128. Malla de panells reposant sobre una sèrie de punts principals al voltant dels quals es posen de relleu els espais d'exclusió generats a l'esquema.

Per generar una certa coherència en la disposició dels focus d'atenció, hem integrat aquests elements dins un esquema de circulacions com el que podem veure a la figura. Els nodes principals queden clarament remarcats en el moment que el conjunt de la malla ha posat de manifest la presència dels espais d'exclusió plantejats en deformar-se al seu entorn.

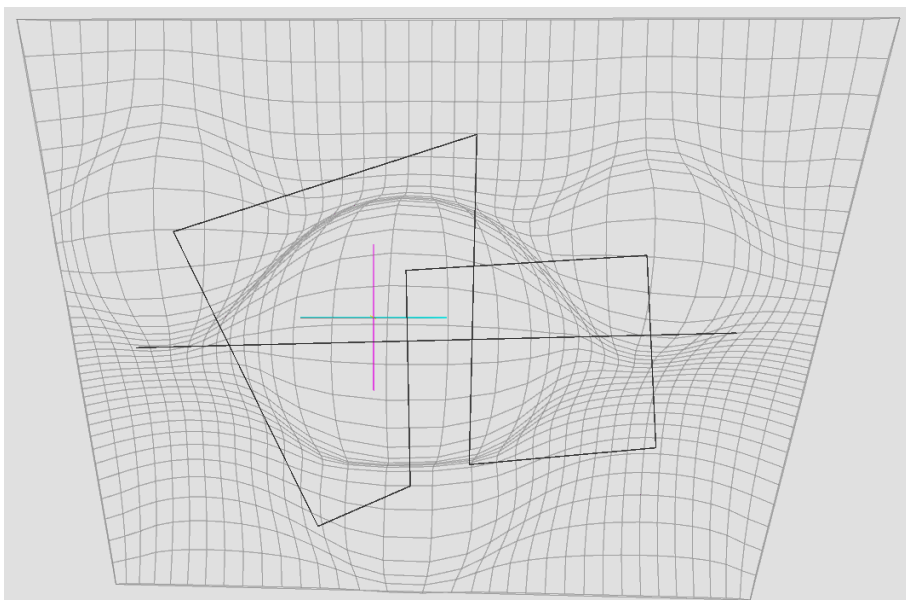


Fig 129. Esquema funcional al voltant del qual reposa la malla. Les zones significades s'han remarcats amb un cercle vermell, com podem veure la malla s'ha adaptat a aquesta configuració.

A partir, doncs, d'aquest estat inicial podem començar a experimentar amb alternatives que ens donin resultats de diferents característiques. Una de les primeres opcions que tenim per experimentar és aprofitar la relació que ja hem establert entre les partícules per generar una força d'atracció entre els vèrtex de la malla i els focus de manera els dos elements es cenyeixin al voltant de l'esquema de partícules. En fer-ho observem que efectivament es remarquen millor les esferes volumètriques de manera que els espais i les fronteres entre ells queden més definits. Un altre aspecte que podem modificar és la tensió de la malla, que ens permetrà fer que la superfície es tensi més o menys segons ens interressi, per fer-ho fem servir cordes elàstiques i els donem tensió interna. Aquesta estratègia permet regularitzar la superfície de manera que el conjunt tingui vores menys accentuades i la morfologia general s'altera considerablement, especialment la manera com queden repartits els panells, ja que la distribució dels mateixos depèn en gran mesura de l'estat de tensions i en variar-lo aquests reaccionen establint una nova posició d'equilibri. Altres maneres de modificar el model inclouen variar el sentit de la força ascendent que infla la malla, variar la intensitat de la força vectorial que manté les vores, etc. Aquests criteris ens permeten jugar amb una gran varietat de possibilitats. Aquesta facilitat per

generar propostes és important de cara a l'arquitecte ja que en el procés de disseny és necessari proposar tantes variacions i exploracions com sigui possible per després poder escollir la millor.

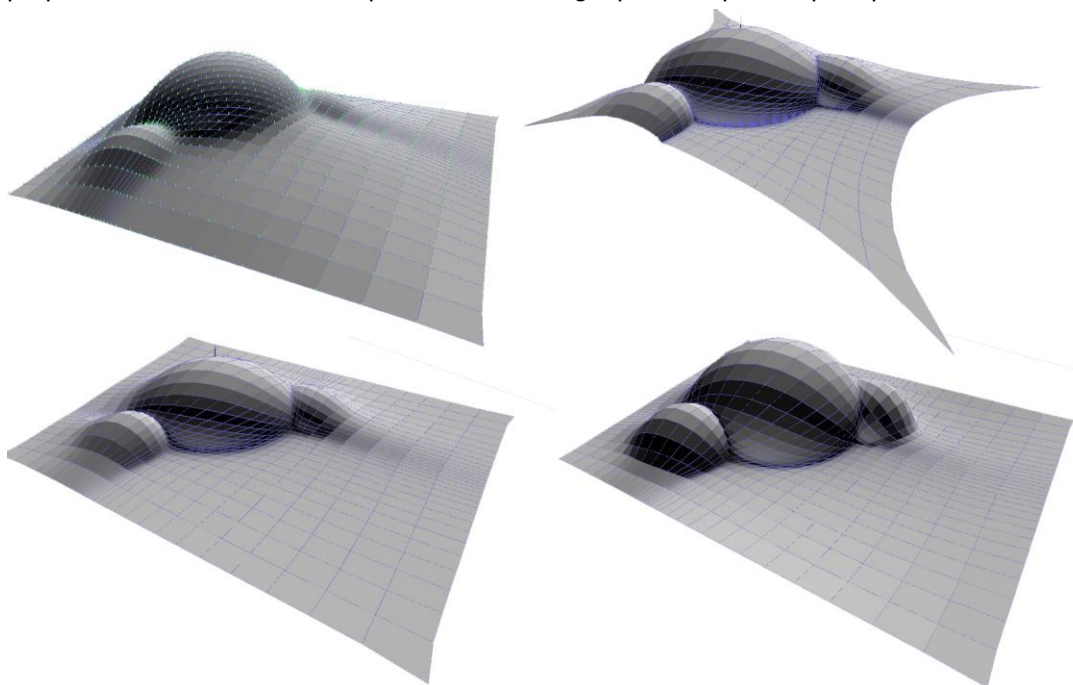


Fig 130. Diferents propostes nascudes del sistema compositiu, a la primera (superior dreta) podem veure un esquema on la malla s'ha tensat. A la part inferior podem veure dos propostes on s'ha augmentat la atracció entre els vèrtex de la malla i els nodes i s'ha aplicat diferent grau de tensió a la malla. Finalment a la part superior esquerra tenim una proposta on s'ha reduït la força vectorial que manté les vores.

5.3.2 Propietats de composició

En certa manera estem plantejant l'arquitectura al revés, primer generem un espai buit i després l'anem envoltant de superfícies, sens dubte aquest és un camí a desenvolupar i que no es pot dur a termes amb sistemes de modelatge convencionals, caldria un sistema o bé dinàmic o bé de booleans en temps real per desenvolupar-lo. En aquest cas el plantejament d'espais com elements invisibles al voltant dels quals hi adherim peces és un sistema viable de disseny que ha resultat de gran utilitat per la seva immediatesa en aquest mecanisme. Desenvolupant aquest mètode observem que a l'interior de la malla es generen una sèrie de recorreguts naturals que són el fruit de les interaccions entre les forces d'atracció dels espais. Aquests recorreguts no els hem dissenyat nosaltres sinó que neixen per la tensió de la malla i posen en connexió cada volum amb el més proper de manera que de forma natural i com a resultat de l'equilibri de tensions entre els diferents focus neixen circulacions directament derivades de la disposició i les propietats dels elements configurats. Si Aquest procés es du a terme de manera acurada, pot

donar lloc a espais interiors de certa complexitat i que ens permeten fer-nos idees esquemàtiques de com serà l'interior que estem generant. Variant un simple dial podem veure com canvia la percepció de l'espai i això és important poder-ho fer mentre es desenvolupa el projecte ja que hi ha molts aspectes compositius i funcionals que en depenen directament i que cal tenir en compte quan encara no hi ha res definit. Un cop fet aquest model inicial es poden treballar i anar comprovant diferents aspectes funcionals i geomètrics.

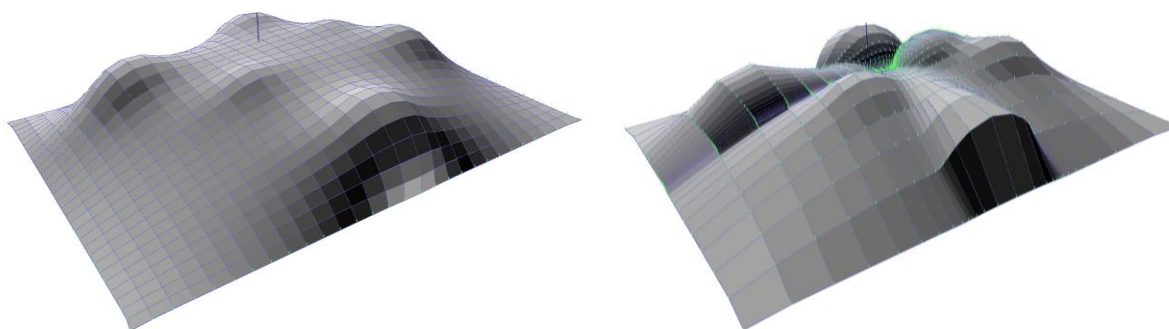


Fig 131. La imatge superior mostra una malla tensa sobre una sèrie de volums esfèrics que l'estiren pels extrems. A la imatge de la dreta s'ha afegit una força d'atracció cap a les esferes de manera que la malla s'ha adherit a les esferes, això ha produït la generació espontània de camins interns

A partir, doncs, de l'esquema presentat s'han generat alhora uns espais interiors i unes connexions que generalment centralitzen l'activitat al punt central de la malla ja que és en aquest punt on convergeixen més forces. Els espais interiors resultants poden tenir interès formal en ser el resultat en negatiu de tots els espais invisibles generats per les esferes que deixen entreveure la seva presència indirectament sobre la malla. Aquests espais tenen direccions molt marcades i tendeixen a generar una jerarquia en el moviment, ja que d'alguna manera conserven la percepció de les forces que els han donat forma. Aquesta inducció al moviment pot ser un factor de disseny objectiu, que es pot introduir com a dada de treball, regulant la seva intensitat de manera que no sigui únicament un fenomen formal sinó que impliqui també un fenomen perceptiu associat. D'aquesta manera tenim un tot format per la percepció, la forma i les relacions dinàmiques.

També és important plantejar la possibilitat de generar volums d'exclusió que no siguin únicament esfèrics sinó cúbics, ovalats o de forma lliure. Aquests plantejament ja l'hem fet servir en altres aplicacions on mitjançant un sistema d'hiperel·lipses tridimensionals hem generat volums d'exclusió de forma complexa que interactuen entre ells de manera realista, rebotant com si fossin sòlids o si es combinen entre ells donant lloc a zones d'exclusió complicades sense un augment significatiu del temps de càlcul. En variar la forma entre el cub, l'esfera, l'oval i l'estrella es pot aconseguir tota mena d'espais que l'ordinador pot operar amb facilitat i per mitja de la

seva combinació es poden generar volums complexos d'exclusió sense requerir temps de càlcul extensos. Això ho inclouré més endavant al programa com a eina de disseny i a més visualitzaré aquest volums, ja que ara mateix no són visibles, de cara a que l'usuari tingui una idea més adequada dels espais proposats.

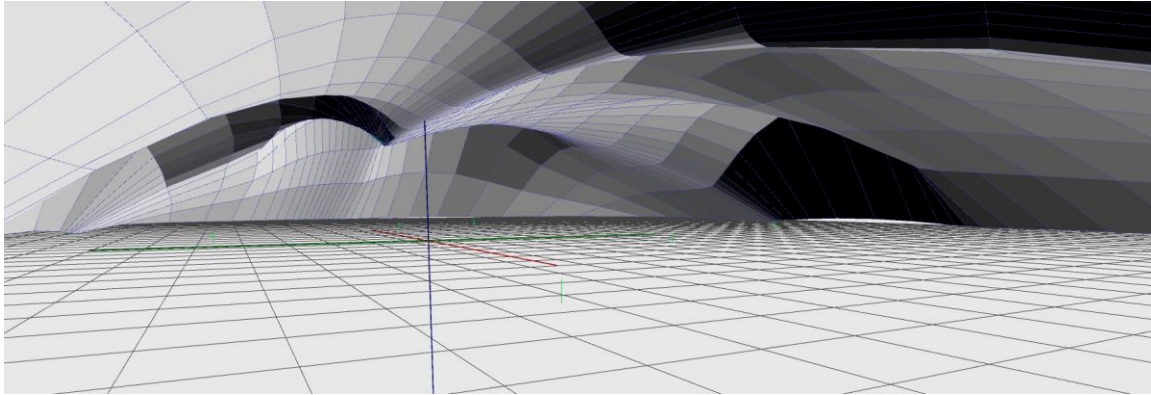


Fig 132. Interior de l'espai generat en el model. Com podem veure es pot percebre la presència en negatiu de les esferes a través de la deformació que produeixen en la malla. Aquestes es veuen estirades per els diferents camps de força de manera que trobem línies de tall o arcs interiors que no són constructivament viables però que desplacen l'atenció cap a certes direccions.

5.3.3 Sistema per focus d'atracció

Una altre mecanisme de disseny es basa en substituir el concepte d'exclusió per atracció, de manera que els nodes principals deformin la malla cap a ells donant lloc a estiraments de la superfície en els quals es generen espais interiors. A diferència del cas anterior els espais generats ara no són el producte d'un volum d'exclusió invisible sinó el resultat d'una deformació en un sentit. Així si volem generar una zona singular, hem de posar un vèrtex que estiri la malla en el sentit contrari de manera que es generi un buit en aquella zona. Aquest mecanisme és més complex de fer servir que el cas anterior ja que cal ajustar molt més les forces perquè el sistema doni un resultat equilibrat i coherent. De la mateixa manera que en el cas anterior primer generarem una malla inicial que ens farà de base, sobre la qual plantejarem el sistema de forces que la deformarà. En segon lloc generarem un seguit de punts d'atracció que seran els encarregats de deformar la malla i que els distribuïré de manera aleatòria per sobre d'aquesta. Un cop fet això podem passar a establir la relació d'atracció entre els punts de la malla i els punts externs. En aquest procés tenim la possibilitat de vincular zones que únicament responguin a l'acció d'un dels focus, d'aquesta manera podem establir un control més acurat del model i fer-lo actuar com si fos una titella dirigida per uns punts de control.

Cal tenir en compte que hi ha diverses maneres de plantejar l'algorisme que atraurà els vèrtex de la malla cap al focus. En el programa n'hem plantejat tres que m'han donat un joc formal prou ric i amb els quals ja tenim una certa experiència perquè els hem utilitzat amb anterioritat per generar tota mena d'aplicacions experimentals. Un dels casos més bàsics consisteix en reproduir la força de la gravetat, que es caracteritza per disminuir la seva intensitat al quadrat de la distància. Aquest acostament té problemes importants perquè fàcilment tendeix o a generar "forats negres" o a tenir un efecte imperceptible de manera que hem aplicat un acostament més atenuat a aquest concepte i en comptes de disminuir la intensitat al quadrat de la distància, li aplico només la distància de manera que no tingui un efecte tant radical. Aquest mecanisme, quan està correctament regulat és un sistema que dona lloc a més riquesa formal que altres plantejaments perquè accentua les irregularitats. Partint d'aquest mecanisme n'hem plantejat un altre en el qual la força es manté constant de manera que aquesta sigui independent de la distància i per tant tingui un efecte continuat sobre el model. Curiosament quan apliquem la força d'aquesta manera la malla deforma cap a un punt intermedi entre els dos focus cosa que uniformitza el model i elimina les asimetries. En l'últim cas hem creat una força inversa a la primera que augmenta el seu efecte amb la distància. També en aquest cas la malla tendeix a moure's cap a un punt intermedi entre els focus i ens passarà el mateix fenomen que en el cas anterior on el model tindrà tendència a homogeneïtzar la seva forma. Per tant una diferència important entre el primer cas i els dos casos següents és que el primer cas radicalitza les formes mentre que els següents les suavitzen. Tot i això els altres casos també tenen algunes qualitats que cal destacar, per exemple l'últim cas s'ha demostrat ideal per modelar formes ja que actua de manera molt intuïtiva de cara al control de la forma, si volem deformar el conjunt cap a una banda només hem d'allunyar el focus corresponent i el cos s'estirà en aquella direcció.

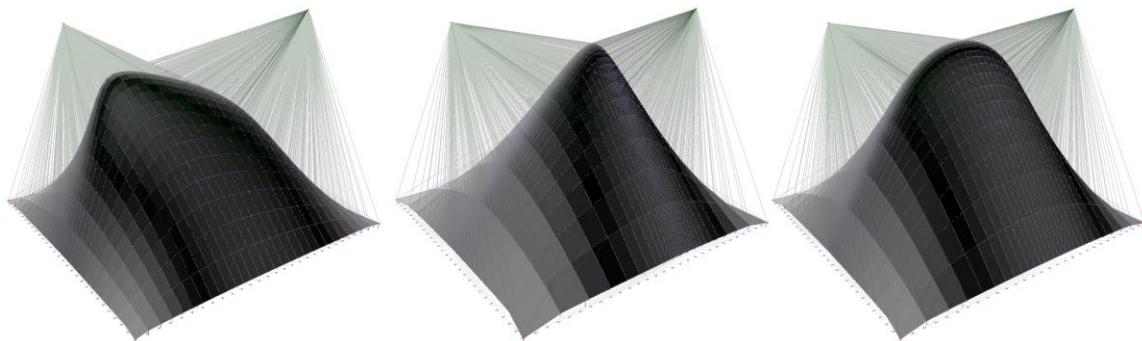


Fig 133. Tres casos d'atracció entre una malla de vèrtex i dues partícules. En el cas esquerra s'ha aplicat el mecanisme escollit basat en una reducció de la força d'atracció segons la distància. En el cas del mig s'ha fet servir el sistema invers, un augment de la força amb la distància. En el cas de la dreta es fa servir una força d'atracció continua.

Com podem veure a les figures quan no fem servir un sistema basat en la reducció de la força d'atracció segons la distància la forma del conjunt tendeix a ser més homogènia, mentre que en el cas contrari de seguida ens apareixen asimetries en algun dels sentits. En qualsevol cas hem deixat la possibilitat de fer servir qualsevol dels tres mètodes d'atracció ja que hi ha casos en els quals ens pot interessar alguna d'aquestes tres possibilitats en particular de cara a generar un sistema de control específic. Un cop hem escollit el tipus d'acció que exercirà la partícula i l'àrea d'influència que tindrà sobre la figura podem començar a equilibrar les accions per tal d'obtenir els primers models funcionals. En ells apareixeran formes volumètriques, generalment de vores suaus i contínues que neixen dels diferents estiraments que pateix la malla a causa de l'atracció de cadascun dels diferents focus. A partir del dial de control de la intensitat del camp podem accentuar les protuberàncies fent que el conjunt tingui un relleu més o menys accentuat. Quan fem servir una configuració d'atracció que augmenta a mesura que es redueix la distància és important tenir en compte que fàcilment ens pot passar que les partícules quedin completament adherides als focus. Per evitar que això passi podem assignar un radi mínim que impedeixi a les partícules ajuntar-se per sota d'aquesta distància, generant una força de repulsió.

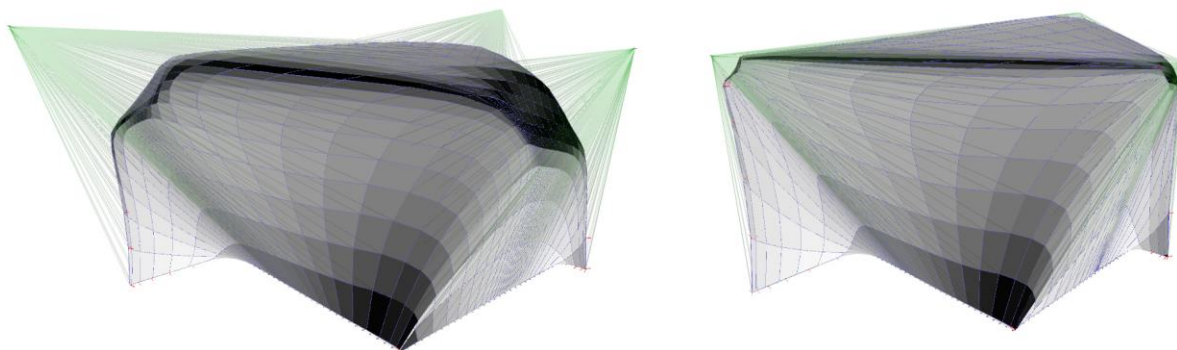


Fig 134. Dues figures en les quals els focus atrauen amb molta intensitat els vèrtex de la malla. Al cas de l'esquerra hem afegit un valor de radi molt elevat, en el de la dreta un valor de radi més petit.

A mesura que anem desenvolupant aquest mètode de disseny podem arribar a generar configuracions de certa complexitat formal segons la mena de relació que establim entre els focus i la malla de base. Fent servir una relació que augmenta l'atracció dels focus amb la distància, es pot generar un model en el qual el control sigui molt més senzill que en els altres dos casos de manera que les deformacions es pugin dominar amb molta més facilitat. Aquest mecanisme resulta molt senzill d'entendre ja que es comporta com una marioneta en la qual en estirar un fil la superfície es deforma proporcionalment. Així, doncs, el conjunt de focus atractius actua com un polígon de control sobre un element complex que ens permet experimentar amb

gran facilitat amb formes complexes només desplaçant alternativament dos o tres focus. D'aquesta manera es pot regular la intensitat i la direcció de les forces que deformen la malla amb un únic sistema i esculpir la forma a partir d'aquest.

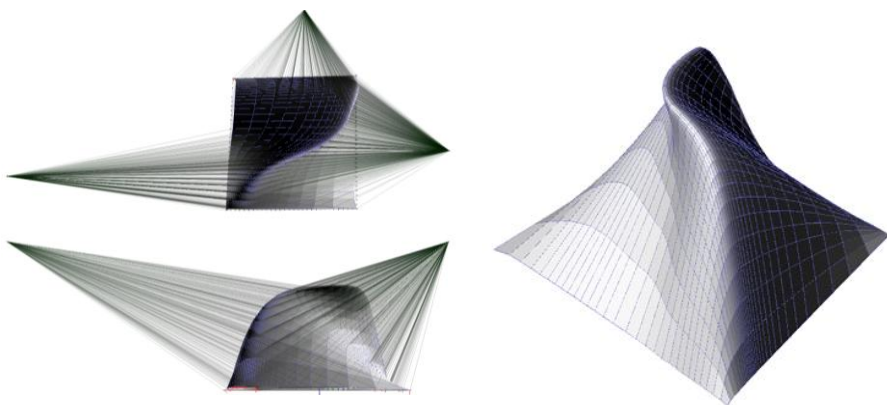


Fig 135. Aquestes tres figures són la planta l'alçat i una perspectiva d'una figura controlada per una sèrie de focus que augmenten la intensitat de la força d'atracció amb la distància.

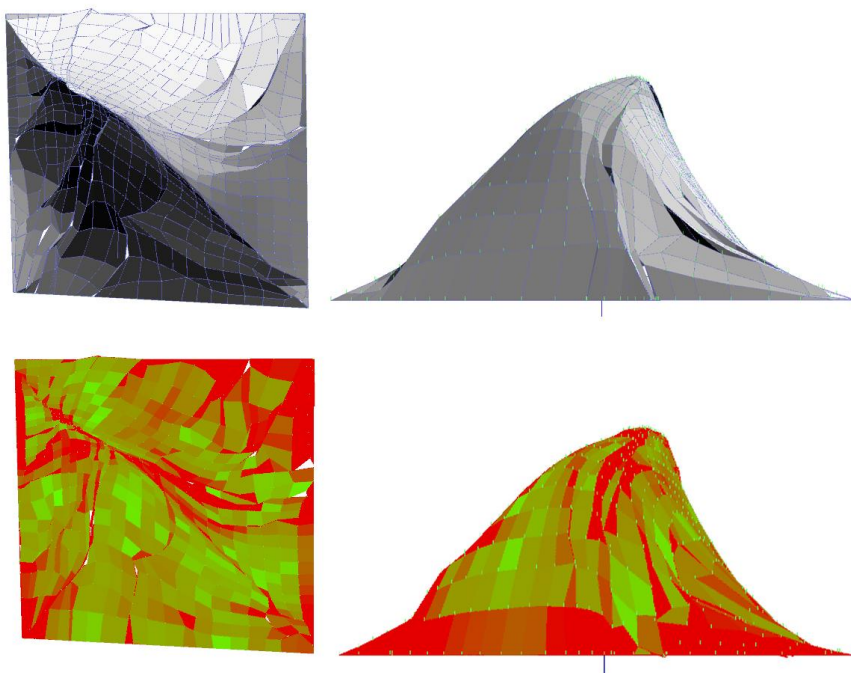


Fig 136. Algunes imatges de model anterior un cop optimitzat per tenir totes les cares planes. Com podem veure hi han els mapes de desviació de les cares que en cap dels panells superava el centímetre de desviació respecte el pla. El model té una mesura d'uns 40 x 40 metres en planta.

Un cop desenvolupat un esquema inicial podem passar a optimitzar el model segons algun dels diferents criteris que vulguem aplicar. Si per exemple volem estudiar la planicitat dels panells podem visualitzar la desviació d'aquests respecte el pla i anar controlant les diferents forces de manera que hi hagi la mínima desviació possible. Aquest procés pot deformar considerablement el model i el resultat de vegades canvia aspectes bàsics de la idea inicial però molts cops això ens permet detectar problemes reals en la geometria de la nostra proposta i fins i tot presentar solucions inesperades a problemes que poden ser molt complexos. Poden a més emergir elements nous que no havíem previst com enfonsaments, voladissos o talls a les façanes.

Segurament també té molt interès veure com un mateix model va evolucionant de manera subliminal al llarg del temps, recordem que aquest procés té lloc per la continua iteració de les funcions dinàmiques sobre el model, que un cop han realitzat les transformacions més importants continuen modificant-lo de manera imperceptible.

5.3.4 Propietats de composició

Un aspecte interessant a nivell del disseny de l'edifici és que mentre que en el cas dels focus d'exclusió el modelatge afectava principalment a l'interior de l'edifici, en el cas del mètode per focus d'atracció ens permet modelar sobretot la part exterior de l'edifici. El moviment es reflecteix a les façanes a partir dels estiraments que pateix fruit de l'atracció cap als focus. Segurament la diferencia principal entre tots dos mecanismes està en que en el primer cas els nodes es troben a l'interior de l'estructura mentre que en el segon es troben a fora. La seva diferent situació fa que siguin necessaris diferents camps de força per poder modelar amb comoditat i això ens acaba portant a tractar el problema de la forma des dos punts de vista que pot ser dins o fora. Així, doncs, veiem que a nivell de disseny la forma pot "emergir" de l'interior per repulsió o pot esculpir-se des de l'exterior per atracció donant peu a sensacions perceptives diferents que els vianants o els usuaris captaran en observar i moure's per l'edifici. Amb sistemes convencionals de treball és molt difícil fer aquesta distinció a causa de la pròpia natura del mecanisme que fan servir per modelar, però en el modelatge basat en la simulació física si que té sentit treballar amb aquestes dues possibilitats. Aquest mecanisme no té perquè actuar exclusivament en nodes, també es podria aplicar a barres o a plans però encara falta desenvolupar les fórmules de col·lisió amb aquests elements en temps real. Tot i que pugui semblar un mètode interessant de treball cal tenir en compte que consumeix molta potència de càlcul per actuar en temps real i més encara si s'han de crear tota mena de col·lisions entre diferents objectes, per això encara cal desenvolupar fórmules que permetin optimitzar aquests processos en gran mesura o bé esperar a veure si es poden aprofitar els càlculs físics que puguin realitzar les targetes gràfiques en el futur per accelerar el procés en nombre molt elevats de partícules.

Un aspecte important que cal ressaltar en aquest exemple és que molts cops les propietats formals d'un model es perden en el moment que apliquem els criteris constructius, com per exemple, mantenir la planicitat dels panells. Això passa en tots els sistemes de modelatge i el sistema basat en simulacions físiques no n'és una excepció. Però a canvi ofereix eines molt eficaces per tractar i resoldre el problema constructiu durant el procés mateix de disseny. En observar la forma final de l'exemple veiem que ha patit canvis molt importants respecte la forma original que presentava l'edifici. En aquest cas el procés de panel·lització es pot haver dut massa

lluny i també és possible que la forma sigui més incompatible amb els panells plans del que podria semblar. Segurament la forma original de vela requeria de més densitat de panells per poder-se dur a terme amb peces perfectament planes i quadrades cosa que no s'ha tingut en compte. També seria convenient fer un anàlisi de les zones més conflictives per tal de tractar-les de manera independent i que no afectessin així a la solució del conjunt perquè cal recordar que aquest mecanisme resol el problema en conjunt. Per tant si una sola part falla tot el model canvia i s'adapta per resoldre el problema i només aïllant les parts conflictives podem arreglar el problema sense modificar la geometria general.

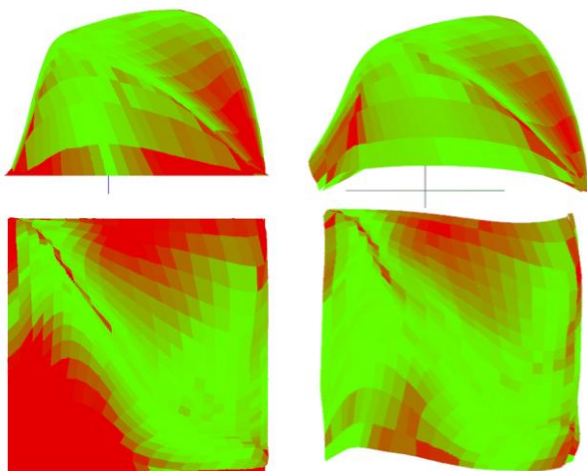


Fig 137. Mapa de planicitat dels panells on podem veure quines zones són les que mes problemes de planicitat presenten. Tal com es veu la forma de vela no és la part que dona més conflicte sinó les parts inferiors del model. A la dreta podem observar com després de permetre al contorn de la base modificar-se lliurement s'ha reduït considerablement la desviació dels panells.

Curiosament el conflicte es troba a la base i no a la part superior de la figura que en canvi presenta les formés de més curvatura. Oferint, doncs, un tractament diferent a les parts inferiors de l'edifici podríem assegurar que la forma es pogués construir amb peces planes i no es perdés la forma de vela. En aquest cas el problema principal es trobava en que la funció que mantenia el contorn de la base de la figura alineat entrava directament en conflicte amb la forma de vela de la part superior de la malla. En realitat gran part dels problemes de les malles per adaptar-se a les formes de curvatura complexa passa pel fet que les condicions de contorn molts cops hi entren en conflicte i cal fer-les flexibles per tal de fer el model viable.

5.4 Malles i forces

5.4.1 El vent

Veient les possibilitats que tenim en el tema de recorreguts podem passar a experimentar amb un altre tipus d'acció que es comporta de manera diferent, concretament simularé l'acció del vent.

Per reproduir aquest fenomen ens cal establir una força general que tingui en compte les particularitats del comportament d'aquesta de la manera més acurada possible. En aquest sentit hem donat l'opció d'aplicar les forces generals amb aquestes particularitats. En primer lloc en cas de tenir plans el sistema té en compte les normals a l'hora d'aplicar l'efecte de la força sobre les partícules. Així si el pla està de cara al vent s'aplica tota la força del mateix, en canvi si està exactament de costat no s'aplica. També es té en compte el fenomen de succió que es produeix quan el pla està mirant just en el sentit contrari de manera que s'estira en el sentit oposat al vent. Una de les coses que cal tenir en compte en realitzar aquesta simulació és que els sistemes de catenària funcionen invertint l'acció de la força. Aquest procediment és vàlid per al cas de la gravetat o en casos d'accions puntuals però en el cas de la força del vent és una mica més complex ja que la inversió no es troba en el sentit de la força sinó en l'aplicació de la mateixa de manera que ha de fer-se a través d'una opció concreta que activa un procediment de càlcul diferent. Hem introduït la possibilitat d'aplicar el vent de manera inversa per poder estudiar els resultats i comprar-los. En el cas dels fluxos no hem aplicat aquest principi perquè tenien una funció purament geomètrica i no estructural per tant aquest principi no s'aplicava.

A continuació generarem un model volumètric similar als anteriors i el sotmetrem a una força de vent que actuï globalment. Quan tractem amb partícules no disposem de normals ja que les partícules són elements puntuals i no superficials de manera que en aquest cas el vent actuaria igual que la gravetat, empentant totes les partícules cap a una direcció. Però si afegim la presència de panells al conjunt si que podem donar una normal a les partícules i per tant podem aproximar com serà el comportament del vent quan incideixi l'aire sobre la superfície. Per aquest càlcul hem considerat el producte escalar de la direcció del vent i de la normal del pla per saber si el vent està donant al panell de cara, de costat o d'esquena i en conseqüència decidir quin comportament ha de tenir l'acció per aquella partícula. Si el vent actua de cara llavors s'aplica tota la pressió d'aquest, però si està de costat o d'esquena aquest no actua. Tot i això cal tenir en compte que si el vent està d'esquena si que hi ha un lleuger fenomen de succió que normalment equival aproximadament a un 20% de la pressió total. Havent introduït aquests paràmetres (relativament senzills) dins el programa hem pogut generar una simulació de vent sobre diferents tipus d'estructures amb panells amb un cert grau de realisme. Val a dir que el càlcul es podria millorar afegint l'efecte Venturi i altres fenòmens relacionats amb la hidrodinàmica, però per a un càlcul de caire general no cal anar tant lluny ja que potser tindrien un efecte poc o gens significatiu.

5.4.2 Vent sobre voltes

De nou farem servir un model senzill, compostat per una malla de panells quadrats, per mostrar les propietats bàsiques que confereix l'aplicació del vent com a eina de disseny. En anar experimentant en diferents casos veurem com l'estructura es deformarà donant lloc a configuracions més aerodinàmiques que la simple cúpula inicial i que per tant s'adaptaran millor a unes condicions climàtiques d'aquest tipus. En plantejar aquest mecanisme com a generador de la forma introduïm en la mateixa fase de disseny l'acció de les forces i per tant podem donar un resultat que satisfaci aquests requeriments estructurals sense desvirtuar l'expressió del conjunt perquè en formarà part. Tot i que els primers resultats que obtenim no són d'una gran complexitat, ja que les forces actuant estan relativament generalitzades de manera que provoquen una reacció molt uniforme, poc a poc anirem veient maneres d'obtenir formes més elaborades a partir de la modificació de la geometria inicial en exposar elements més complexos o concrets a aquesta força per veure'n el resultat. Tot i això en els models senzills ja podem observar alguns aspectes significatius que després es repetiran per les casos de major complexitat.

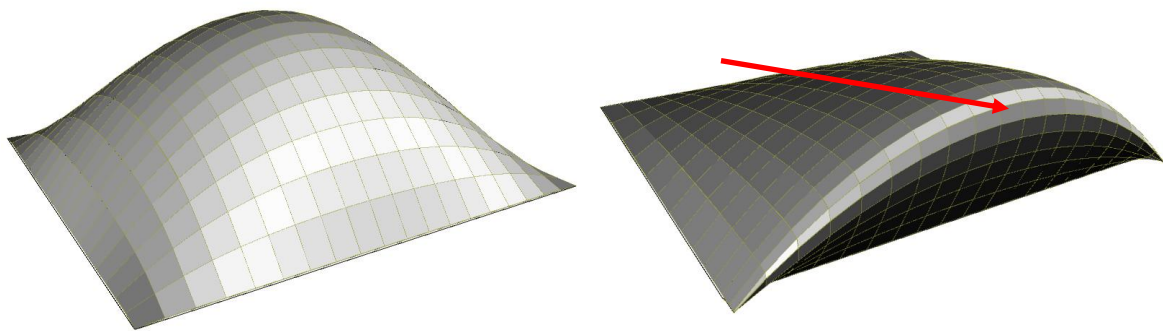


Fig 138. Transformació d'una malla composta de panells quan la sotmetem a la força del vent. A l'esquerra es veu l'estat inicial mentre que a la dreta veiem l'estat final un cop que el vent ha incidit sobre ella. La recta vermella ens indica la direcció en la qual està bufant el vent.

Quan apliquem el vent sobre la malla aquesta pateix un estirament a causa de la pressió que aquest exerceix sobre els panells. Això dóna lloc a una forma aerodinàmica on els panells s'han orientat de manera que aquest passi oferint la mínima fricció possible i per tant posant-se de cantell o directament en sentit contrari al vent. En general la forma sembla que estigui estirada com si simplement una "gravetat" lateral fes "caure" la malla cap aquest cantó però en el programa hi ha algunes diferències importants entre la manera com actuen les forces generals

convencionals i la força del vent que es poden apreciar en comparar l'efecte que tenen ambdós casos sobre una mateixa malla.

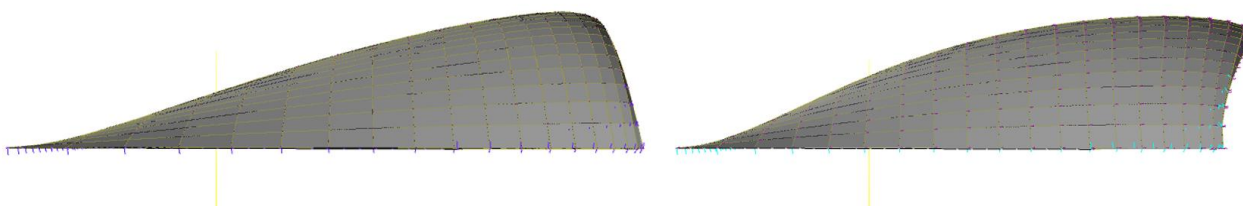


Fig 139. Comparació entre el perfil d'una malla a la qual se li ha aplicat una força d'estirament (esquerra) i una sobre la qual s'ha aplicat una força de vent (dreta).

La curvatura que obtenim en aplicar vent no és ni molt menys igual a la que obtenim amb un estirament ja que si bé l'estirament tendeix a produir una superfície que sembla penjar en el sentit horitzontal, en el cas del vent produeix una curvatura molt específica que més aviat dóna una forma com de castanya, que no és reglada. Sobretot, en observar el remat posterior de la forma veiem que és completament diferent, ja que quan apliquem un estirament no es té en compte el fenomen de succió que en canvi sí que es té en compte en aplicar la força del vent. El conjunt pren, doncs, una forma que guarda certa similitud amb el cap d'un ocell, cosa que és perfectament lògica i en certa manera dóna confiança en la funcionalitat del resultat. En aquest sentit la similitud amb formes naturals ens serveix per verificar que els efectes obtinguts siguin més òptims que l'estat inicial. Una de les opcions que tenim és aplicar el vent de manera inversa fent un procés similar al de la catenària i obtenint estructures que resisteixen el vent només a compressió. Aquest mètode no és sempre adequat ja que de vegades dóna lloc a resultats que són funcionalment menys òptims que els obtinguts segons l'acció natural de vent ja que plantegen la forma des d'un punt de vista estructural i aquesta consideració fa que el sistema no busqui evitar una acció del vent sinó només resistir-la, per tant de vegades dóna lloc a solucions que oposen més resistència al vent que la necessària.

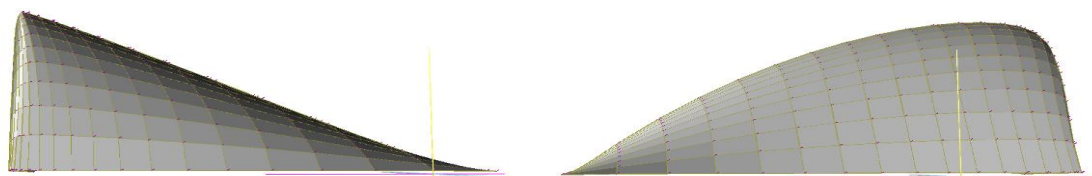


Fig 140. Comparació entre el perfil d'una malla a la qual se li ha aplicat una força de vent inversa (esquerra) i una sobre la qual s'ha aplicat una força de vent natural (dreta). La segona ofereix menys resistència, la primera en canvi funciona estructuralment a compressió però no redueix la resistència.

Les condicions de contorn també juguen un paper significatiu en aquest procés ja que en ser punts fixats obliguen a la resta d'elements a adaptar-se a la seva configuració inicial de manera que totes les deformacions posteriors vindran condicionades per la seva posició. Jugant amb

aquest recurs podem obtenir diferents tipus de resultats que permeten una certa exploració formal amb l'acció d'aquesta força. Un experiment interessant consisteix a modificar les condicions de contorn fent servir models de malla més complexos que donin lloc a situacions curioses quan apliquem l'acció del vent. El resultat deixarà de ser tant previsible com ho ha estat fins ara i mostrarà un major interès formal amb una tendència general a crear formes més aerodinàmiques i espais exposats i altres de protegits segons la direcció del vent. Això indueix una inevitable sensació de moviment que en certa manera té lloc en deformar la figura en una direcció determinada. Compositivament, doncs, és un recurs que ens permet expressar velocitat, direccionalitat, i que separa els espais entre espais interns i externs. Estructuralment el model perd algunes de les propietats dels sistemes funiculars perquè aquests es veuen afectats per una tendència a inclinar-se en el sentit del vent cosa que per suportar-ne millor les accions haurien de fer en el sentit contrari. Així com ja passava amb els models que es veien atrets per corbes de recorregut, ara el sistema estructural es desvirtua perquè es deforma cosa que fa perdre la lògica funicular. Això es pot solucionar si fes actuar l'acció del vent en sentit invers, cosa que hauria de fer-se formulant de nou l'algorisme que computa l'acció d'aquest de manera que els arcs funiculars es deformessin per suportar-ne l'acció. El problema d'aquest procés és que el vent, a diferència de la gravetat, no es pot considerar una càrrega permanent i per tant no sembla gaire recomanable aplicar-lo al sistema funicular. Per altra banda, d'aplicar-se en sentit invers, obtindríem estructures preparades per resistir la seva acció a compressió, la forma general s'optimitzaria per oferir la menor resistència possible i tindríem així una solució puntual.

5.4.3 Propietats Propietats de composició

El resultat formal tendeix a ser similar a les dunes comuns d'un desert o les formacions rocoses de gran antiguitat sobre les quals el vent ha actuat durant molts milions d'anys. Mentre que una de les seves cares es mostra completament llisa a causa de l'erosió continuada, a l'altre es generen cavitats que ens poden recordar formacions naturals com coves o altres orificis rocosos. El primer que notem és l'aparició d'una cresta que separa les zones exposades de les zones obagues, això dona a entendre que hi ha un límit a partir del qual el vent ja no actua o no ho fa amb la mateixa intensitat. Curiosament aquesta cresta tendeix a ser recta en planta encara que la seva altura variï, això fa que tot el contorn de la malla vagi a convergir a un límit.

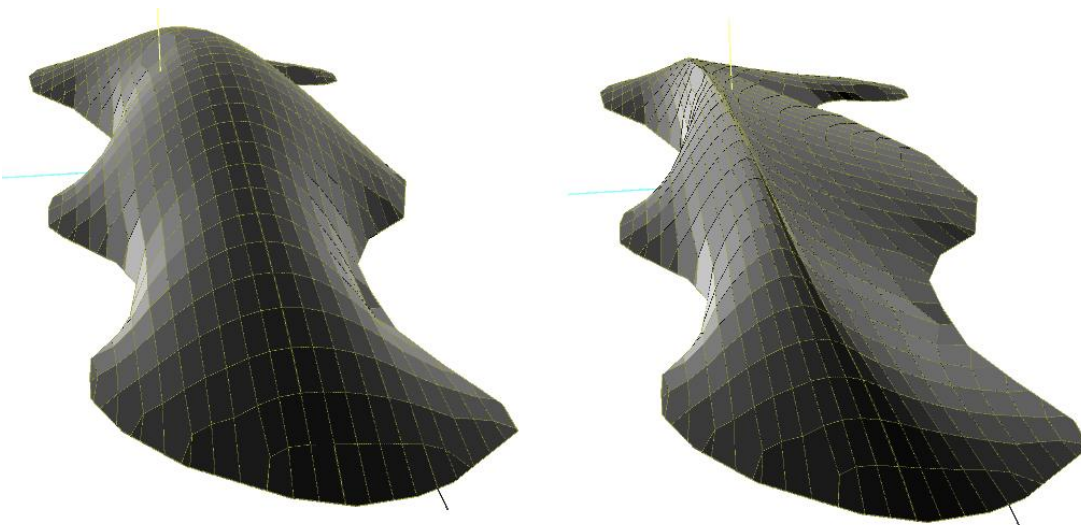


Fig 141. A dalt imatge del desert de Dasht-e-lut a l'iran, a comparar amb la figura anterior. A l'esquerra dues imatges en les quals es pot veure el procés de transformació d'una malla de contorn lliure. Les transformacions que pateix en aplicar-li la força del vent mostren nombroses similituds amb algunes formacions naturals

Si es dóna el cas que la forma no és uniforme, es formen diverses crestes però sempre tendint a seguir una recta en planta. Per altra podem veure que a diferència del que passa amb les forces generals l'acció del vent només actua notòriament sobre les cares exposades mentre les altres queden iguals. Això fa que la tendència no sigui tant a estirar la malla sinó a generar una forma triangular on la cara inclinada respon a les cares exposades però apareix també una part recta corresponent a les parts no exposades.

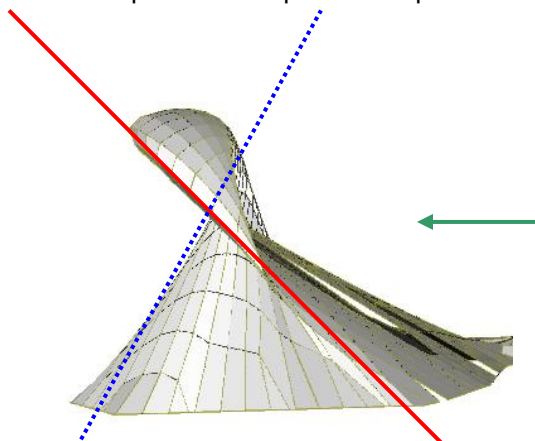


Fig 142. Cas d'inversió de la cresta on la malla es travessa a si mateixa donant lloc a un resultat formal incorrecte.

Així, doncs, l'acció del vent transforma els objectes d'una manera característica en la qual aquests tendeixen a estirar-se cap a un cantó, deixant la cara exposada més llisa i alineada a la direcció del vent, mentre que l'altre queda molt més vertical en estar arrezerada. Un dels defectes que pot sorgir en aplicar aquest mecanisme és que la part arrezerada pugi més alt que la part exposada. Llavors es produeix un fenomen d'inversió formal en el qual apareix com un sobresortint per tota la cresta de la formació com si s'inflés. Aquest efecte pot controlar-se per mitjà de la regulació de les forces. Fins ara hem provat un vent relativament uniforme però el vent no sempre actua així, de vegades un mateix cos rep diverses empentes de vent en diferents direccions en tota la seva estructura de manera que la reacció pot ser diferent.

A continuació aplicaré aquesta mena d'accions sobre elements verticals de certa alçada en els quals les accions del vent acostumen a ser un factor important en el seu disseny.

5.4.4 Vent sobre elements volumètrics

A partir de la generació d'elements volumètrics que tinguin les seves cares formades per malles puc plantejar esquemes que vegin alterada la seva forma a causa de l'acció del vent. Si bé l'estat inicial pot ser un cos relativament senzill, quan li apliquem diferents afectacions de vent la forma resultant guanya complexitat a mesura que va responant a totes elles. Les deformacions tendeixen a arrossegar els plans cap a la direcció de la força, tot estirant l'estructura i generant enfonsaments o sortints laterals. En aquest procés podem veure que apareixen importants voladissos a l'estructura que no sempre són estructuralment viables.

Al primer cas aplico una força continua de vent a tota l'estructura. Aquest model manté la seva forma per mitjà de forces vectorials que retenen les vores alineades, a més estiren les vores de les malles perquè aquestes quedin tenses, així, doncs, l'esquema estructural es comportaria com un edifici sostingut per un esquelet exterior rígid, degut a això, a diferència dels casos anteriors, no hem aplicat cap força ascendent contraria a la gravetat ja que no m'ha calgut cap estratègia destinada a donar volum al model. El planteig, doncs, és notablement diferent als casos de malla i per tant representa una manera alternativa de plantejar el disseny.

La força de vent actuarà només en una direcció afectant a dues de les sis cares de l'edifici, una per acció directa sobre les cares i un altre per succió. El resultat és que les cares afectades s'inflen com una vela de vaixell fent entendre que potser caldria fer alguna mena de forat a la part central de la façana per tal que l'aire passes amb més facilitat i no acumulés massa pressió. Per tal de visualitzar amb més facilitat les deformacions hem deixat transparents dues de les cares laterals de manera que es pot observar l'interior i l'exterior de les façanes. Això ens ajuda a

entendre el que passa al conjunt de l'edifici. En aplicar de manera natural l'acció del vent veiem que la façana frontal s'ha vist arrossegada com si fos una vela i que un fenomen similar però a menor escala ha tingut lloc amb la cara posterior degut a la succió. En aquest cas l'estructura respon a l'acció del vent de manera natural així que ens pot ser útil per veure com es deformarà el conjunt sotmès a aquestes condicions. Mitjançant l'observació del mateix podem plantejar mecanismes de millora, com l'obertura de forats al punt central per tal d'alleugerir les càrregues, en funció dels resultats, però no ens servirà per optimitzar automàticament la forma del mateix.

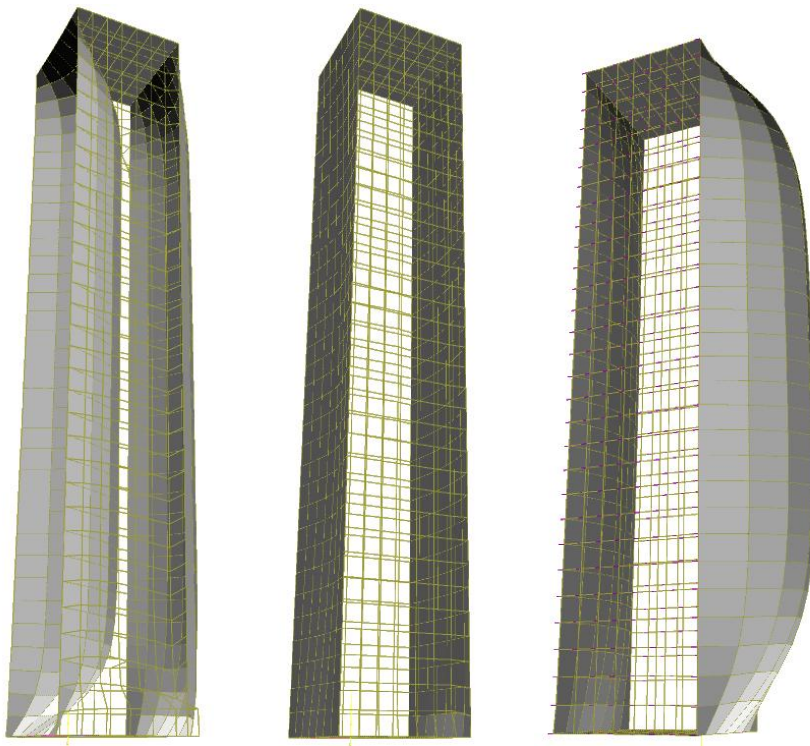


Fig 143. Tres imatges que descriuen un edifici en altura sotmès a una força de vent, des de l'estat inicial al centre fins a la forma obtinguda per l'aplicació natural de la força a l'esquerra, i un model d'aplicació inversa a la dreta que resistiria el vent a compressió.

Aplicant l'acció inversa el que obtenim és un disseny que pretén suportar a compressió les accions abans esmentades i que en aquest cas optimitza la forma de cara a oferir menys resistència. Fixem-nos que a la façana principal la inclinació va exactament en sentit oposat al vent generant així un arc resistent, que no tindrà la mateixa curvatura que un arc funicular però que resistiria en horitzontal l'acció del vent seguint el mateix principi. Un fenomen similar a menor escala té lloc a la part posterior on es planteja un arc que dirigit cap a l'interior pretén suportar la succió a compressió. Si les accions que estan actuant tenen diferents direccions estarem sotmetent el model a múltiples accions de vent alhora, aquest cas purament especulatiu, ens

permet plantejar una forma que sigui capaç de resistir el vent en totes les direccions i així solucionar el problema que teníem quan només fèiem actuar una força de vent. En aquest cas el model patirà deformacions de diferent natura i podrem començar a buscar una solució que respongui de manera general. Val a dir que a diferència del que passaria amb les forces puntuals la resultant de diverses accions de vent que actuïn en sentits contraris sobre una partícula no té un efecte nul ja que les accions tenen en compte l'angle amb la normal del node i per tant això afecta al resultat de manera diferent en ambdós casos. Podem aplicar, doncs, múltiples accions de vent, en sentits oposats sense anul·lar el seu efecte entre elles. En el cas mostrat a la figura hem fet actuar quatre forces en els principals sentits cardinals de manera que obtingut un aspa.

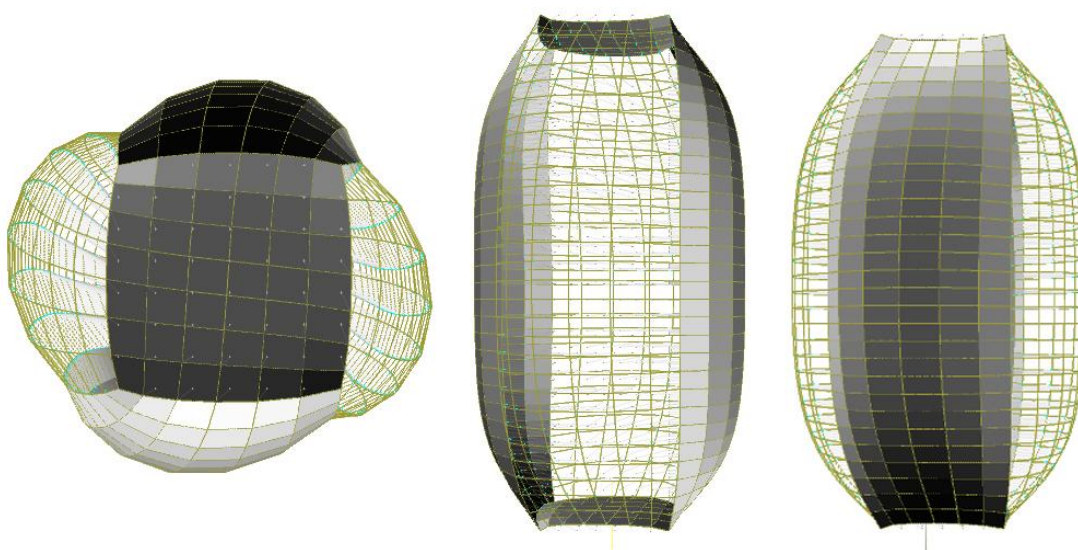


Fig 144. Estructura volumètrica sotmesa a múltiples càrregues de vent en les quatre direccions cardinals. Recordem que les accions de vent en sentit oposats no s'anul·len. En aplicar el vent invertit aquesta morfologia hauria de ser adequada per resistir aquesta mena d'accions a compressió.

El resultat mostra algunes particularitats que val la pena esmentar. El primer que notem és la forma d'hèlix que pren el conjunt, en aquest punt no està clar perquè pren una disposició asimètrica quan totes les accions són iguals i simètriques entre elles. Dos factors poden donar lloc a aquesta mena de resultat, o bé alguna falla en el càlcul que no hem pogut detectar, o bé que un resultat simètric no sigui estable i necessàriament l'estructura giri en un sentit o un altre de manera que en el moment que una ala es desvia totes les demés la segueixen. Aquesta última opció guanya força pel fet que en un primer moment el resultat és perfectament simètric, però a mesura que passa l'estona a partir d'un moment concret comença a girar cap algun cantó i finalment acabem obtenint la forma d'hèlix. Aquest comportament sembla seguir la lògica d'un mecanisme que no és estable i necessita deformar-se per ser-ho. En el model no s'han tingut en compte les components verticals per poder estudiar millor com és l'acció múltiple de vent sobre

una estructura d'aquesta mena. Si el mecanisme és capaç de fer que tot el sistema treballi a tracció és possible que en un cas real actuï quasi exclusivament a compressió. Però també hi ha un altre conclusió. Que el sistema no sigui capaç de donar un resultat simètric pot voler dir que la solució proposada no és estable i que tendeix a girar contínuament com un molí. Si ens fixem en els quatre punts fixos dels extrems superior i inferior podem observar que són els únics punts on tenim compressions (i per tant traccions a la realitat) la qual cosa ens deixa entendre que si no estiguessin fixats aquesta forma giraria sense parar. Possiblement aquest fenomen ens estigui indicant que no és possible resoldre aquesta acció només a compressió perquè d'aquesta manera no podem equilibrar totes les accions i per això el sistema és inestable. Per tant obtenir un resultat asimètric quan les forces i les formes són simètriques ens pot indicar que el sistema no està equilibrat.

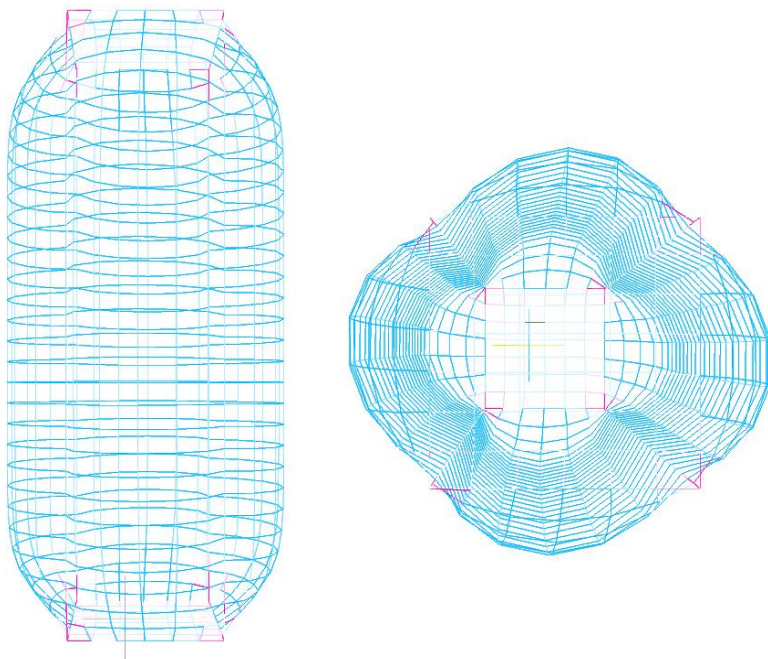


Fig 145. Estructura volumètrica en la qual podem veure l'estat de càrregues a l'estructura quan actua el vent, el color blau correspon a les accions a compressió i el color lila a les traccions. Com podem apreciar l'estructura treballa majoritàriament a compressió. A més podem observar que les tensions verticals són quasi inexistentes mentre que les horitzontals són molt pronunciades. Cal tenir en compte, doncs, quin aspecte volem estudiar, perquè en aquest cas s'han obviat les accions verticals y només n'hem deixat les horitzontals.

Del que serien accions internes de l'estructura la força vectorial, que manté les arestes de l'edifici alineades, és la que juga un paper més important. Aquesta força un cop més entra en contradicció directa amb la força externa del vent ja que el vent intenta arrossegar l'estructura cap a un costat i cap a l'altre, generant vores sinuoses, mentre que les forces vectorials intenten mantenir les vores sempre alineades de manera que s'inicia una lluita entre totes dues accions. Regulant aquestes accions podem obtenir diversos resultats dels quals a la figura en mostro únicament un. En realitat podríem obtenir infinits estats intermedis segons la manera com regulem aquestes dues accions. Degut precisament a l'acció de les forces vectorials que mantenen les arestes principals alineades el sistema ha donat lloc a quatre sectors. Si

eliminéssim aquestes accions obtindríem un sistema de forma esfèrica que segurament no seria del tot estable i giraria sobre si mateix sense parar. Recordem que no és un cas real i que únicament ens serveix per veure quina seria la forma òptima per resistir múltiples accions de vent.

5.4.5 Propietats de composició

Com ja hem vist en el cas del focus d'atracció aquest mecanisme també actua des de l'exterior i ens permet treballar el disseny del nostre projecte. El resultat acostuma a donar un aspecte aerodinàmic al conjunt, que dóna la sensació de desplaçar-se. Aquesta percepció es pot correspondre amb moltes classes de moviment i no únicament al desplaçament lineal perquè en el cas de l'acció de 4 vents simultanis hem vist que el sistema dóna la sensació de tenir un moviment circular sobre el seu propi eix com si fos un molí. Cal, doncs, estudiar bé la relació que hi ha entre les forces actuant i la sensació que transmet el model resultant per poder dominar els aspectes expressius. Així segons la manera com fem actuar les forces es traduirà en una sensació que en el cas del vent tant pot ser de desplaçament com de rotació i en altres casos pot donar lloc a altres aspectes de moviment com l'explosió o implosió, desplom, ascensió, etc. Aquest casos poden respondre també al comportament estructural de l'edifici de manera que es fa servir aquest comportament de forma expressiva com a part del disseny.

Els resultats d'aquest procés recorden algunes propostes actuals per generar gratacels com el ja conegut "Turning Torso" de Calatrava en el qual s'expressa precisament aquest moviment circular o altres propostes més arriscades com la generació de gratacels composts per peces giratòries, que es moguin al voltant de l'eix central, i que es vagin orientat segons les necessitats de l'entorn. A diferència d'aquests casos però en el sistema de modelatge dinàmic la forma no la genera directament l'arquitecte sinó que neix com a fruit espontani dels seus plantejaments i en aquest sentit no és una decisió arbitrària sinó el fruit coherent d'un plantejament.

Tesi doctoral. **Els sistemes cinètics com a eina de disseny en arquitectura.**

Estudi de disseny avançat amb camps de força

6 Casos d'aplicació dels sistemes dinàmics

Com que el fet de fer servir un sistema de modelatge basat en sistemes dinàmics no és habitual, es fa difícil trobar casos d'aplicació en la nostra pràctica. De totes maneres, partint de la base que l'experiència guanyada amb l'ús del programa ja estableix un precedent d'aquests possibles usos que puguin tenir els sistemes dinàmics i tenint en compte experiències anteriors sobre el tema en les quals aquest mecanisme s'ha fet servir en el disseny de pavellons ¹⁷⁹ y en els sistemes de malles tènsils hem arribat a la conclusió que de moment hi ha tres camps d'aplicació molt clars, el primer seria l'aplicació com a eina generativa de disseny, el segons seria l'aplicació com a sistema de panel·lització i el tercer seria com a eina de disseny de superfícies tènsils. A més d'aquests casos també hi haurien més possibles aplicacions però que no tindrien un ús tan immediat sinó que caldria adaptar el sistema per donar el màxim rendiment en cadascuna d'elles, que seria el control de geometries complexes, la capacitat d'establir un control paramètric d'elements en dues dimensions i la capacitat d'encaixar plantes a partir de mesures preses in situ, estalviant el procés d'encaix que sol ser llarg i propens a l'error. Aquests últims casos neixen de la voluntat d'anar una mica més enllà tenint en compte que el sistema ha estat plantejat com un mecanisme de modelatge universal de manera que caldria explorar què pot fer en situacions que tradicionalment no li han estat pròpies. Amb aquest plantejament, doncs, aniré exposant diferents casos d'aplicació en què s'aprofiten diferents qualitats dels sistemes dinàmics per resoldre algun problema relacionat amb l'arquitectura i que amb un cert desenvolupament podria donar lloc a mecanismes més eficaços que els que fem servir actualment.

La manera com entenc la possible integració dels sistemes dinàmics en el món de l'arquitectura és en combinació amb els sistemes de modelatge estàtic als quals complementarien. Aquesta integració però requereix d'un replantejament general de l'estratègia de treball perquè aquests mecanismes puguin actuar en temps real com un element més del dibuix. És interessant fer notar que aquest potencial afecta igualment al 2D tant com al 3D la qual cosa és avantatjosa de cara a trobar-li possibles aplicacions en arquitectura ja que el dibuix sobre el pla és encara una peça fonamental del món de l'arquitectura i no estic completament convençut de que això canviï a llarg termini. Un altre punt clau és que tant el procés generatiu com el sistema d'optimització formal es basen en el mateix mecanisme i això ens permet incloure els condicionants geomètrics entre les diferents claus de disseny sense necessitat d'adaptar el model més endavant.

¹⁷⁹ Kolarevic, B., *Architecture in the digital age · design and manufacturing*, 2003 Taylor and Francis group **Pag 123 - 137**

Entre les potencialitats més interessants que demostren els sistemes dinàmics trobem la possibilitat de generar un control paramètric de l'objecte de manera purament gràfica sense implicar en cap moment cap tipus de programació. Això comença a ser un pas important de cara millorar els sistemes de modelatge actuals ja que si bé la capacitat de modelar amb sistemes de programació tova com *Grasshopper* han suposat un pas endavant molt important en molts aspectes, ara també es planteja la possibilitat de fer quelcom similar sense ni tant sols sortir de la lògica de dibuix. Aquest recurs és útil per a processos de panel·lització en els quals cal controlar la geometria d'un gran nombre d'elements de manera àgil.

6.1 Disseny conceptual

De cara al disseny conceptual d'un edifici haurem de transformar les sol·licituds que tindrà el nostre projecte en camps de força que estirin del model. D'aquesta manera les formes són un derivat directe de les necessitats reals del projecte. Els espais, les circulacions o les obertures neixen d'un plantejament esquemàtic del programa de l'edifici com a camps de força. Aquest esquema funcional acostuma a actuar sobre una malla la qual s'adaptarà a les condicions imposades generant una superfície mes o menys continua. Aquests sistemes són especialment adequats per al disseny de grans superfícies (normalment cobertes o façanes) amb formes complexes o formades per peces.

El primer exemple el basaré en un edifici en altura, en el qual dissenyaré la volumetria externa i sobre el qual actuaran diverses forces. Aquestes l'aniran modelant donant com a resultat un element que tindrà una sèrie de propietats geomètriques i formals concretes. D'aquest model generaré múltiples variants en les quals mostraré diferents aproximacions al problema del disseny amb sistemes dinàmics.

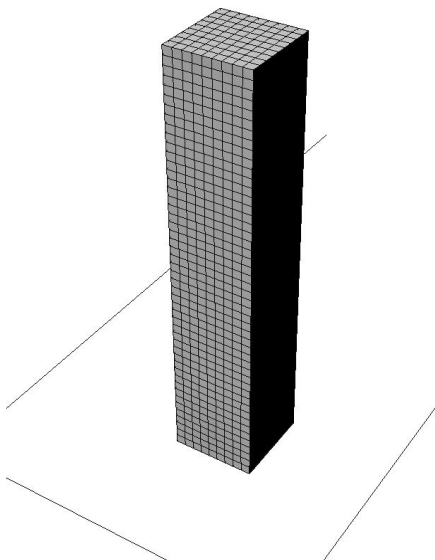


Fig 146. Estat original

La base a partir de la qual aplicaré totes aquestes forces serà un cos cúbic estirat cap amunt compost d'una malla de 10 x 10 m en planta i de 10 x 50 m en altura. Amb aquest nivell de definició estaré controlant 2000 panells en temps real, als quals cal afegir tots els nodes i barres implicats.

Les forces inicials que regeixen aquest element són les de planicitat de cada panell, les de distància per a les barres i les forces vectorials a les arestes de l'element que mantenen les vores del cos alineades. Cal dir que els vèrtexs només es poden desplaçar sobre el pla horitzontal

perquè la Z està bloquejada. Gràcies a això m'asseguro que tots els punts es mouran només en la seva planta

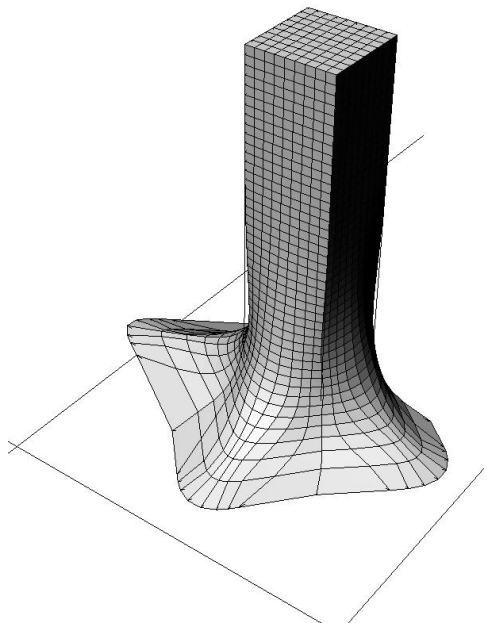


Fig 147. Atracció a vies properes

La primera força que afegiré sobre aquest element serà l'atracció de les vies properes sobre les malles laterals de manera que es generin un moviment que vagi a buscar les circulacions que alimentaran l'edifici. Aquestes deformacions estiraran el conjunt de peces generant plecs i estiraments que es sumaran a les forces de cohesió de les malles.

Per aplicar aquesta interacció hem generat unes barres que simulen els recorreguts al voltant de l'edifici i hem vinculat els punts de la base de la malla a aquests per mitja d'una força d'atracció. Podem veure que la deformació no té lloc que qualsevol manera sinó que es genera tenint en compte la planicitat de les cares implicades (sobretot les de la part inferior de l'edifici).

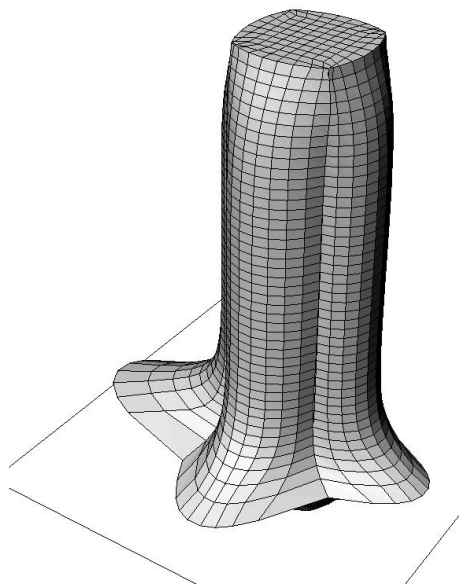
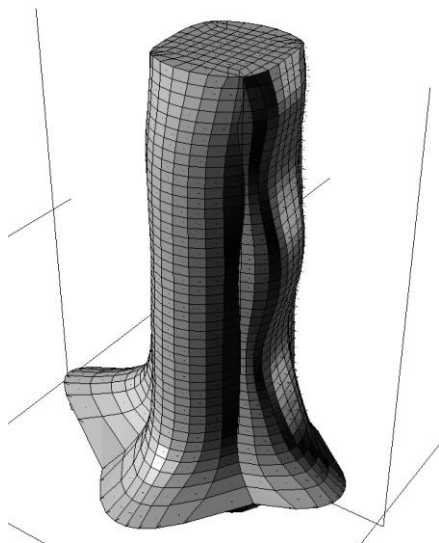


Fig 148. El vent

La força del vent s'aplicarà sobre els nodes d'aquest edifici perquè en ser un element en altura es veurà segurament afectat per aquest fenomen. En aquest cas ens convé aplicar la força del vent invertida perquè així obtingui un element que sigui aerodinàmicament capaç de resistir el vent horitzontal a compressió. En aplicar aquest força obtindré una deformació estirada i arrodonida cap a fora a partir de l'objecte original. El vent s'aplica en les quatre direccions principals i com veiem les forces vectorials a les arestes impedeixen la línia de l'edifici es trenqui.

**Fig 149. Obstacles**

A les forces anteriors se li ha sumat la presència d'obstacles esfèrics invisibles que han generat unes zones d'exclusió al voltant de les quals la malla es retira. Aquestes zones generen enfonsaments a la vora de l'edifici donant lloc a un perfil sinuós que tant pot respondre a un criteri de disseny com a una necessitat del projecte com per exemple no envair certes zones a l'espai, ampliar o reduir la superfície útil de certes plantes, etc. Cal esmentar que en aquest cas els nodes d'atracció / repulsió són exteriors de manera que produeixen enfonsaments en la superfície de la façana, però si estiguessin situats a l'interior de l'edifici inflarien la façana generant l'efecte contrari. Segons el disseny que vulguem

obtenir ens interessarà un cas o l'altre. Aquestes nodes poden ser entesos com a punts de control de l'edifici que permeten deformar-lo per atracció o repulsió tal com si fos una superfície NURBS o qualsevol altre element. Per altra banda aquests nodes estableixen interaccions amb el conjunt de la malla de manera que estiren els vèrtex com si fossin les cordes que controlen una titella tal com hem vist en els apartats anteriors.

6.1.1 Planeïtat de les cares

Un cop hem generat aquestes tres forces obtenim un model inicial sobre el que podem treballar des de diferents criteris. El primer que hi aplicaré serà criteri constructiu amb el qual s'optimitzarà el disseny per fer que totes les cares de l'edifici siguin sempre planes. Això simplifica enormement la tasca de fabricació de l'edifici i acostuma a ser un problema molt complex que amb metodologies convencionals és molt difícil resoldre, però amb el sistema dinàmic queda resolt en pocs minuts. En aquest cas la funció ja estava actuant en tots els models anteriors però amb poca intensitat ara el que farem serà intensificar aquesta força per sobre les altres de manera que com veurem el model pateix una sèrie de modificacions que alteren el disseny general sense perdre les intencions inicials del projecte. Les majors modificacions es produiran a la zona inferior de l'edifici ja que és on es generen les deformacions més exagerades i per tant on la planicitat de les cares pateix més. En la resta del cos aquest tractament no aporta canvis significatius respecte al model inicial.

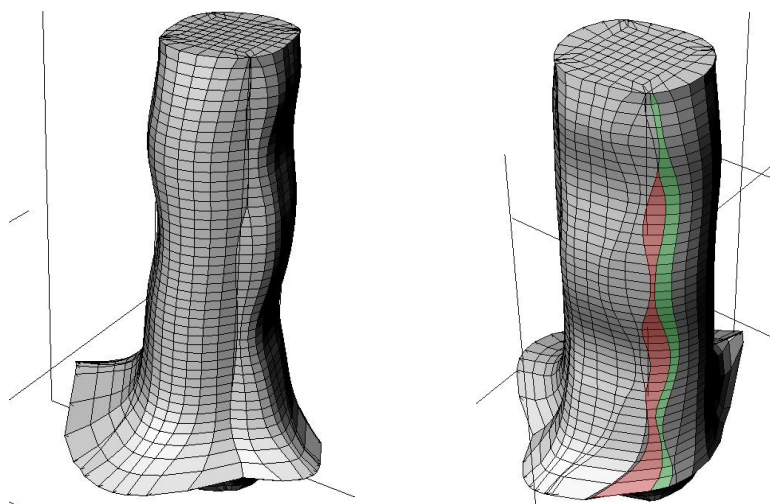


Fig 150. Model de l'edifici un cop aplicada la funció de cares planes sobre el model. Com veiem la curvatura de les vores s'ha solucionat amb un tall sinusoidal entre diferents feixos verticals de plans que formen un conjunt de plans amb un sol grau de curvatura (feixos verd i vermell), la qual cosa es fa especialment evident en el cas de la dreta.

Tal com veiem a les figures els panells que tenen una inclinació igual o similar s'han agrupat per zones i s'han separat per línies sinuoses d'altres zones amb inclinacions diferents. Aquesta és la millor manera de mantenir la planicitat de les cares seguint una forma corbada. Per altra banda alguns panells han desaparegut reduïts a simples escletxes embegudes entre dues zones de panells diferents. Els canvis més importants en aquest sentit els trobem a la base de l'edifici que ara, gràcies a aquest procés, es podria construir amb panells estrictament plans com ara planxes de vidre però que a canvi ha perdut la seva forma original, per adaptar-se a una forma similar que pot ser construïda amb panells plans. En general la forma de l'edifici ha perdut curvatura en favor de la generació de superfícies planes de manera que ens va oferint propostes de solució als problemes més greus relacionats amb la curvatura de certes zones.

6.1.2 Estudi de peces similars

De cara a facilitar la construcció i fer molt més senzilla la fabricació dels panells d'aquest edifici hem fet servir la funció experimental que ens permet igualar els panells entre ells per limitar a un nombre determinat per l'usuari el tipus de panells. D'aquesta manera es poden crear un nombre limitat de motlles a partir dels quals generar tots els panells plans que conformaran l'edifici. Un dels problemes que encara no hem pogut resoldre és que inevitablement el sistema deixi marges importants a les vores entre els diferents panells ja que la condició d'igualtat és tant restrictiva que de vegades és impossible encaixar una forma lliure. Aquesta aproximació de moment sí ens permet distingir en temps real les zones de la façana que compartiran un mateix tipus de panell cosa que és de gran ajuda a l'hora de resoldre aquest conflicte per vies alternatives. En aquest cas el problema geomètric és molt més difícil de resoldre que però de poder-ho fer amb facilitat

significaria un abaratiment substancial en el preu que caldria pagar per construir una superfície irregular perquè a partir d'un nombre limitat de motlles plans relativament senzills es podrien generar tota mena de superfícies sense majors complicacions.

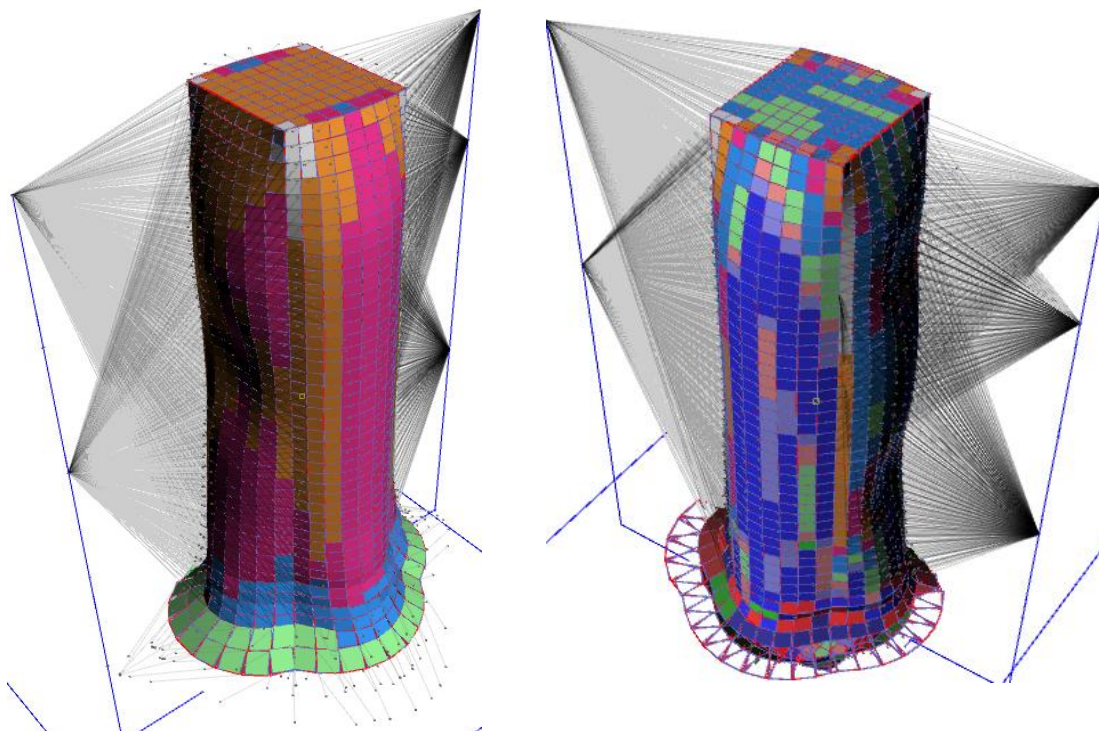


Fig 151. En les dues figures podem observar com es distribueixen els panells perquè les peces siguin iguals entre elles. En el cas de l'esquerra hem admès 5 tipus de peça mentre que en el cas de la dreta n'hem posat 15. Com veiem el cas de la dreta s'ajusta més encara que no arriba a ser exacte.

En el tronc principal de l'edifici l'encaix entre els panells és molt millor que a les parts inferiors on hi ha més conflicte a causa de la morfologia extrema dels porxos que van a buscar les circulacions, de manera que el sistema no ha tingut problemes a l'hora d'ajustar les peces i aconseguir un encaix raonablement bo en la part del fust. La part inferior que correspon a la dels voladissos en canvi presenta una gran varietat de tipus cosa que indica que hi ha problemes seriosos d'encaix de difícil solució. Aquests problemes han comportat canvis importants en la forma de l'edifici que en general han tendit a la uniformització en forma de plans i a la reducció dels elements sortints. Si ens fixem en l'extensió dels porxos veurem que són molt més petits i simètrics que en els altres casos perquè aquest és un dels requeriments que imposa la igualtat entre peces. Per altra banda observant aquest resultat preveig que el coronament del voladís es pot resoldre amb un sol tipus de planxa de forma trapezoïdal de manera que la vora fos perfectament arrodonida. En conjunt el sistema ha modificat el model per fer-lo més construïble amb peces de tipus limitats.

6.1.3 Model final

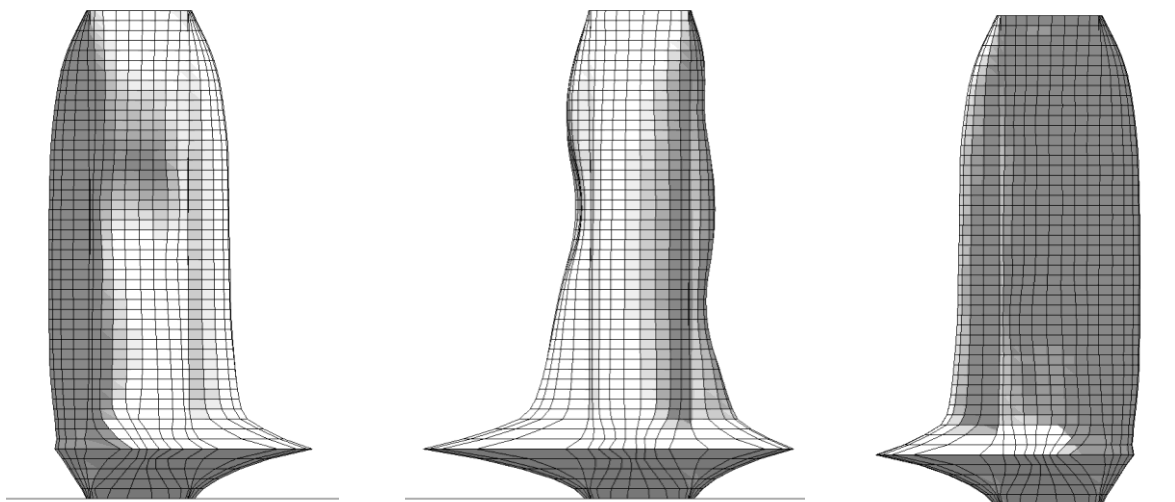


Fig 152. Alçats laterals i frontal del resultat.

Per al model definitiu hem optat per assegurar la planicitat de totes les cares però no hem volgut integrar la igualtat de totes les peces ja que el sistema encara no ens permet fer-ho amb resultats prou precisos. Igualment el fet de que tots els panells siguin realment plans ja és un avenç important respecte a sistemes anteriors on les formes lliures només es podien construir a partir de panells triangulars i no de peces quadrades o hexagonals, augmentant així el nombre de barres per cada node de manera innecessària. Per altra banda no hem volgut desvirtuar el disseny inicial obtingut a partir de l'acció de les forces aplicant un tractament massa restrictiu com el que hem observat en el cas de les peces iguals de manera que hem necessitat un sistema més flexible que ens permetés conservar les intencions inicials del projecte.

En la proposta final, doncs, han actuat totes les forces esmentades menys la que iguala els plans entre si, donant prioritat a la força del pla. En observar el resultat es pot veure no s'ha perdut la idea inicial del projecte malgrat els diferents processos d'optimització a que s'ha vist sotmès donant lloc a una pell que podria cobrir tota una sèrie d'espais interiors. En aquest cas només hem tractat les façanes d'un edifici en altura ignorant el seu interior però ja hem vist que en mantenir-se tots els punts bloquejats en la seva component Z no s'ha perdut la seva correspondència amb els forjats. Encara que en aquest cas no s'ha considerat distribució interior es podria introduir com a camps de força que tenen un efecte sobre la façana igual que ho hem fet amb els obstacles o el vent. El problema és que actualment això sobrecarregaria el model i es

faria difícil controlar-lo. En aquest sentit cal un major desenvolupament de l'eina per poder controlar els camps de força amb una major eficàcia i així poder jugar amb els sistemes dinàmics amb una major eficàcia.

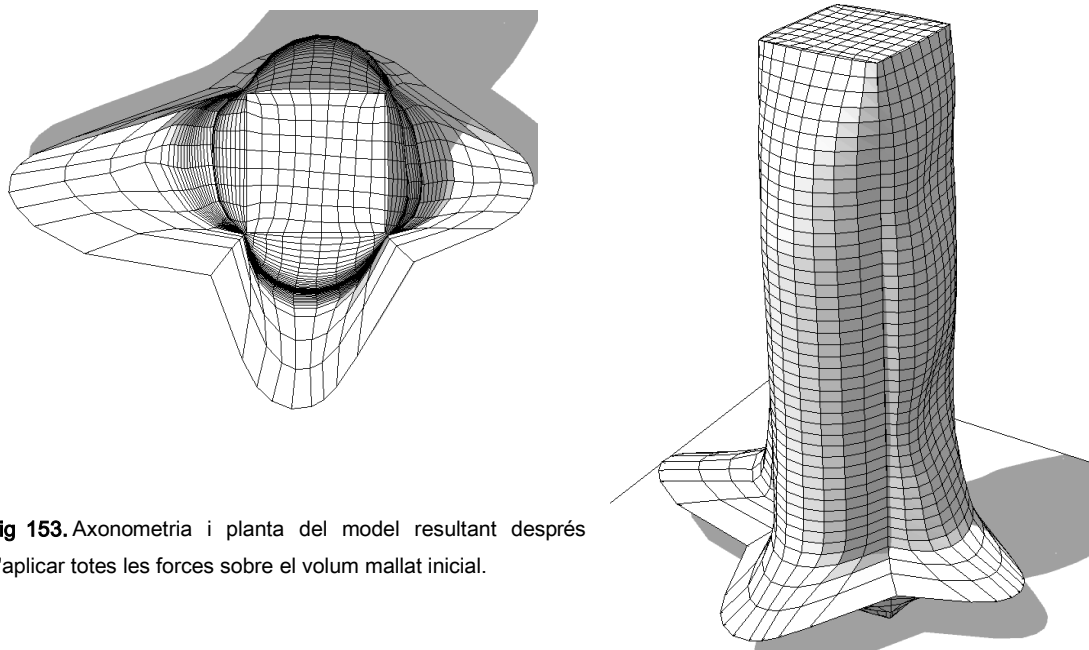


Fig 153. Axonometria i planta del model resultant després d'aplicar totes les forces sobre el volum mallat inicial.

6.1.4 Anàlisi del resultat

En estudiar la planicitat dels panells hem pogut observar que dels 1926 panells només 47 tenien desviacions superiors a 1 centímetre per a superfícies d'1.5 m² de mitjana, sent la desviació mitja de 3 mil·límetres i la desviació estàndard respecte aquesta mitja de 4 mil·límetres (cal tenir en compte que molts panells desvien de la mitja perquè tenen menys desviació i no més). Per altra banda hem donat un marge de dos centímetres als panells de manera que la planicitat es considera que té lloc sempre i quan puguem juga amb aquest marge. En fer el mapa de desviacions de les cares veiem que les majors desviacions es produeixen a les vores de les superfícies còncaues siguin sortints o entrants mentre que les zones planes o les zones de curvatura simple queden relativament ajustades perquè no ofereixen un conflicte tant pronunciat entre els plans dels panells i les superfícies de la façana. Per comprendre millor com ha transformat el sistema d'optimització el nostre model podríem deixar-lo actuar durant molta més estona i comparar el resultat obtingut amb l'estat original. Tot i que aquest resultat no és útil de cara al disseny ni tampoc és construïble, si que ens permet detectar les estratègies generals d'encaix que ha fet servir el sistema per comprendre el que ha passat en el procés d'ajust.

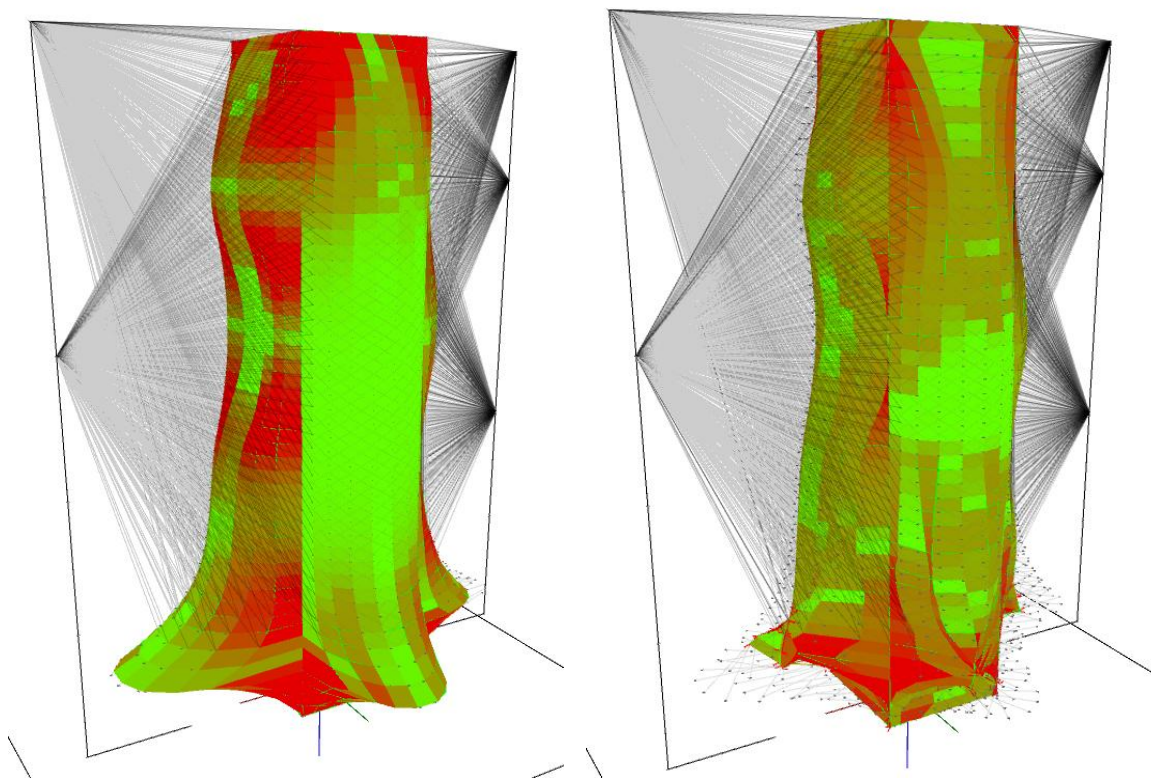


Fig 154. En el cas de l'esquerra veiem el mapa de desviacions del pla el model final. A la dreta en canvi veiem el mapa de desviacions del mateix model després de deixar actuar el procés d'optimització molta més estona.

Un dels primers fenòmens que podem veure en observar els mapes de desviacions és que el sistema ha absorbit els problemes de planicitat en algunes zones repartint el problema a tots els elements del seu entorn i per tant disminuint-ne la intensitat. Altres estratègies han consistit en augmentar la grandària de les peces més planes i fer desaparèixer les que prenen més desviació. En general el model a tendit a perdre curvatura en tots els seus punts fent que la planicitat sigui més fàcil d'assolir en transformar el model en una versió esquemàtica del mateix on totes les façanes són elements plans com si fos un model de paper. És important, doncs, entendre que encara que no ho percebem el sistema modifica tot el conjunt de forma coherent per adaptar-lo a les condicions de planicitat de les peces en una transformació que pot ser relativament complexa. Aquesta transformació té lloc en el conjunt en diverses zones alhora i segueix un patró d'actuació coherent amb el disseny de l'arquitecte de tal manera que fins i tot pot ser que se'n noti l'efecte encara que aquest sigui fonamental per la futura execució de l'obra. Així, doncs, pot ser considerada com una valuosa eina auxiliar per al disseny en arquitectura.

6.2 Panel·lització

El mercat de Sta. Caterina a Barcelona ofereix una sèrie de característiques formals que són molt adequades per a comprovar el comportament dels sistemes dinàmics sobre un element real. Si bé amb sistemes convencionals és difícil de treballar amb aquestes superfícies amb sistemes dinàmics tenim la possibilitat d'experimentar amb tota mena de solucions.

El primer que hem hagut de fer és reconstruir una part de la coberta del mercat de Sta. Caterina a partir de la documentació que hem pogut trobar. Aquesta la hem modelat en forma de superfícies NURBS creades a partir de les corbes que defineixen les seccions de la coberta. Un cop fet això hem importat les superfícies NURBS al programa de simulació dinàmica i hi hem sobreposat diferents tipus de malla. Per aproximar el problema hem creat malles de poca densitat i encara que les peces resultants eren molt grans, ja m'han permès començar a obtenir els primers resultats on hem constatat que la millor aproximació al problema era utilitzant una configuració de panells hexagonals col·locats en espiga.

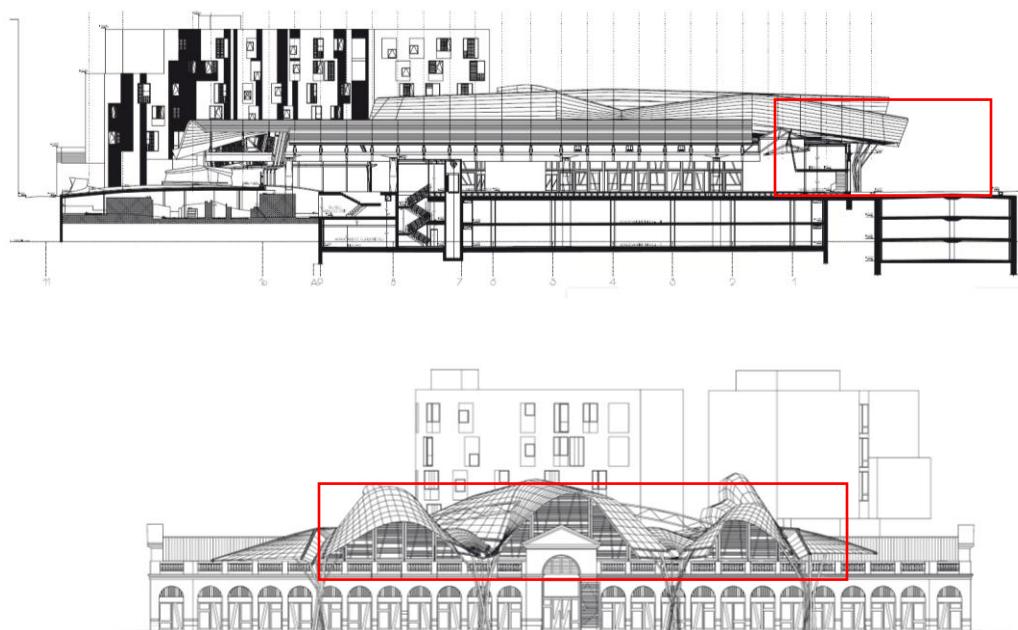


Fig 155. Alçat lateral i alçat frontal de Sta. Caterina.

La part de la coberta que hem reconstruït conta de dues ales laterals i una ala central corresponents a la façana que dona l'avinguda de la catedral. Per aproximar el problema primer hem tractat els tres elements en conjunt i després la solució la hem plantejat a partir d'un sol element.



Fig 156. Fotografia de la zona tractada.

Originalment la coberta es va cobrir amb panells hexagonals relativament petits en comparació a la mateixa. Però en el nostre cas intentarem que el sistema proposi solucions que es basin en adaptar les peces a la forma de la coberta i no a reduir-les fins que la curvatura relativa d'aquesta respecte a cada peça sigui insignificant. Per altra banda les malles que aplicarem a la superfície poden ser de dos tipus, hexagonals o rectangulars. Cadascuna té característiques diferents i com veurem oferiran avantatges i inconvenients quan s'apliquen sobre aquest cas.

6.2.1 Panells rectangulars regulars

Per panel·litzar aquesta superfície farem servir malles a les quals donaré la condició d'igualtat per a les seves cares. Aquest sistema ens interessa perquè seria convenient cobrir aquestes superfícies amb un nombre limitat de motlles, cosa que els faria molt més assequibles. Quan treballem amb malles de quadricula l'encaix entre les peces ofereix molt poc joc perquè es tracta d'un esquema que acostuma a tenir un comportament rígid per això el sistema troba certes dificultats en plantejar alternatives. Les úniques variants que trobem al panell rectangular o quadrat són les formes trapezoïdals que en aquest cas han donat la solució.

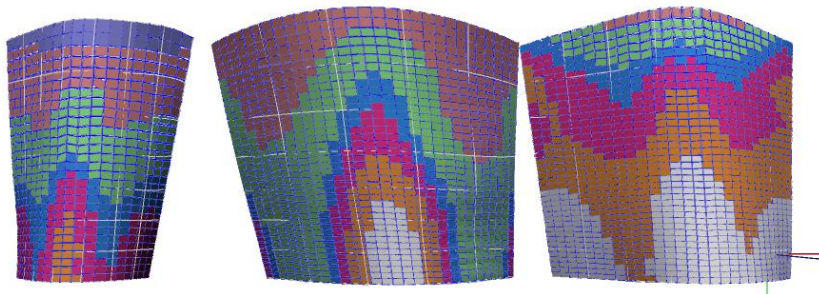


Fig 157. Es pot observar com al tractar tot el conjunt de cobertes amb 7 tipus diferents de peça hem obtingut la següent distribució de zones amb peces iguals.

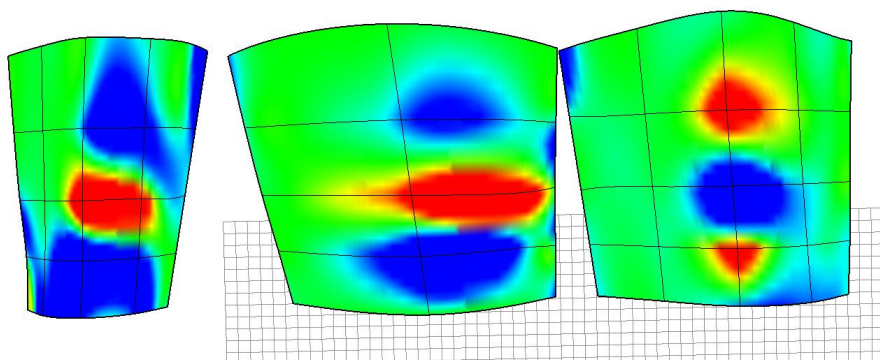


Fig 158. Mapa de curvatures de les superfícies obtingut amb el RHINO.

Un dels avantatges de les malles en quadricula és que tenen un procés de càlcul molt senzill i això fa que es puguin aplicar a molts elements alhora i visualitzar les àrees que comprenen peces iguals. D'aquesta manera permeten entendre de manera ràpida com es distribueixen les zones de panells iguals per la curvatura de la superfície. Així, doncs, es poden fer servir aquestes malles com a sistema d'anàlisi per detectar zones de panells iguals ja que els resultats són vàlids per qualsevol tipus de malla tot i que poden patir algunes variacions menors. Aplicant aquest sistema al conjunt de les cobertes obtenim un gràfic molt interessant perquè ara veiem quina continuïtat té cada tipus de peça en el mapa de zones de tot el conjunt. Cal tenir en compte però que aquesta distribució en part respon a unes condicions concretes de densitat de panells, tipus d'encaix entre peces i propietats de les forces que actuen de manera que quan les condicions canvien la distribució es veu lleugerament afectada perquè la forma és el resultat no només de la geometria sinó també de la interacció entre les forces. Però en termes generals és una guia vàlida per qualsevol cas. Per altra banda el mapa de distribució de peces sembla seguir un criteri que no es correspon amb el mapa de curvatura de la superfície (cosa que m'ha sorprès). En fer el mapa de curvatures gaussiana de les cobertes en RHINO hem pogut constatar que el resultat obtingut no es corresponia amb el gràfic que ens oferia el sistema dinàmic i que per tant no hi havia relació directa entre tots dos casos. Segurament, per sobre dels criteris de curvatura n'hi ha d'altres que tenen a veure amb la longitud transversal i longitudinal de les seccions de la coberta en la posició de la peça estudiada. Així doncs, amb la malla quadrada n'hem tingut prou per fer un anàlisi previ i comprovar que la distribució obtinguda és similar encara que canviï la morfologia de la malla o la densitat d'aquesta.

En aplicar aquesta malla sobre la coberta central hem pogut oferir una primera solució. En aquest cas hem donat més densitat que en l'anàlisi general de manera que la malla s'ha pogut adaptar millor a les condicions de curvatura. Un dels punts més importants, en cobrir aquesta superfície amb peces iguals, és que a cada zona cal fer una transició d'un tipus de peça al següent i això el sistema ho acostuma a resoldre plantejant peces especials o bé dissenyant les peces de manera que els diferents tipus encaixin entre ells. Per aconseguir l'encaix definitiu de les peces hem disminuït la intensitat de les forces que interfereixen amb la força que ajusta la

mallat a les peces iguals (forces lineals, del pla i altres) obtenint així una solució en la qual les juntes entre les peces han quedat raonablement reduïdes i en la qual amb només 5 tipus de peça s'ha pogut solucionar tota la coberta. Tot i això hem hagut d'augmentar la densitat inicial a una malla de 30 x 45 peces perquè els encaixos siguin adequats. El més important és que no apareguin marges excessius a les juntes entre les peces ni tampoc superposicions que impossibilitin l'encaix de les mateixes.

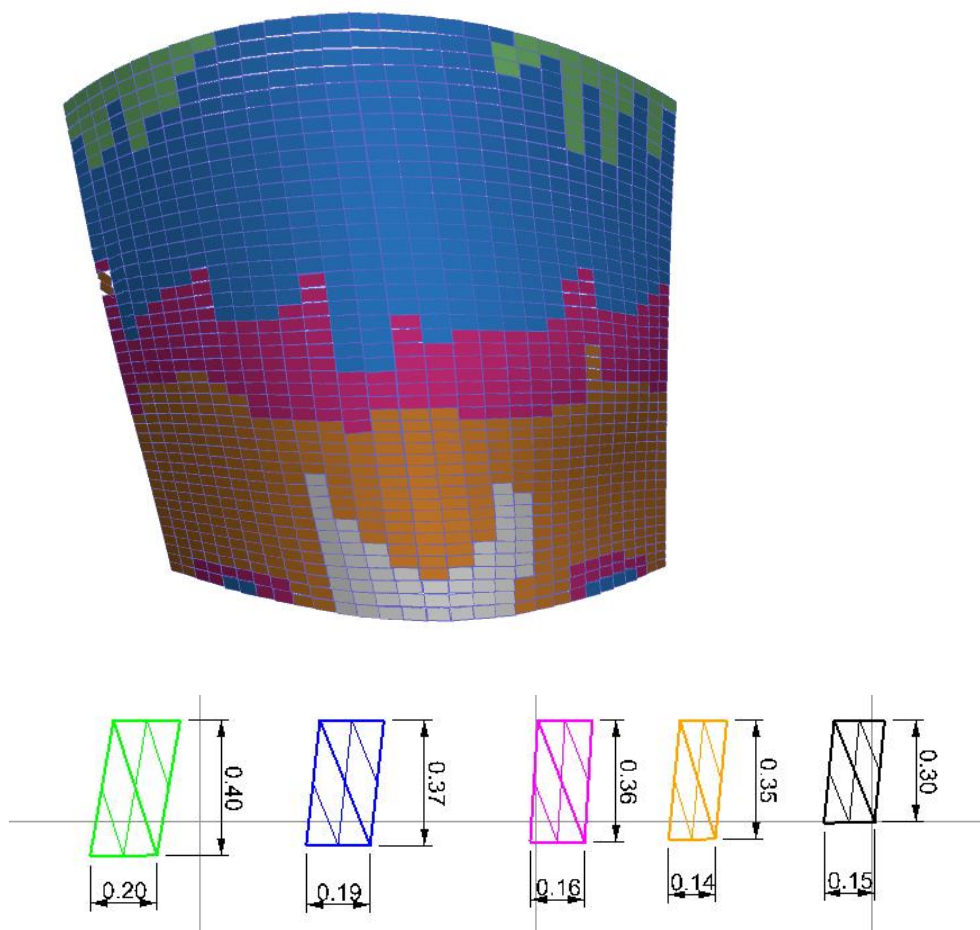


Fig 159. Solució obtinguda amb el programa a partir de la regulació dels camps de força.

En el resultat veiem que les peces han esdevingut formes trapezoïdals amb un angle que està al voltant dels 84° . Totes les peces tenen aproximadament la mateixa inclinació fent que encaixin entre elles. Tot i això encara trobem alguns problemes d'encaix per superposició a la part posterior de la superfície on el sistema no ha pogut acabar d'ajustar el resultat, cal tenir en compte que aquest sistema encara no està complet i necessita un cert desenvolupament per donar resultats definitius per a qualsevol cas. Per compensar aquesta mancança hem donat l'opció de reduir la grandària de les peces de manera que es poden reduir fins que les

superposicions desapareguin però en aquest cas obliguem a que es generin marges. En el cas present hem reduït la peça un 2%, millorant molt l'encaix general encara que han quedat algunes superposicions residuals.

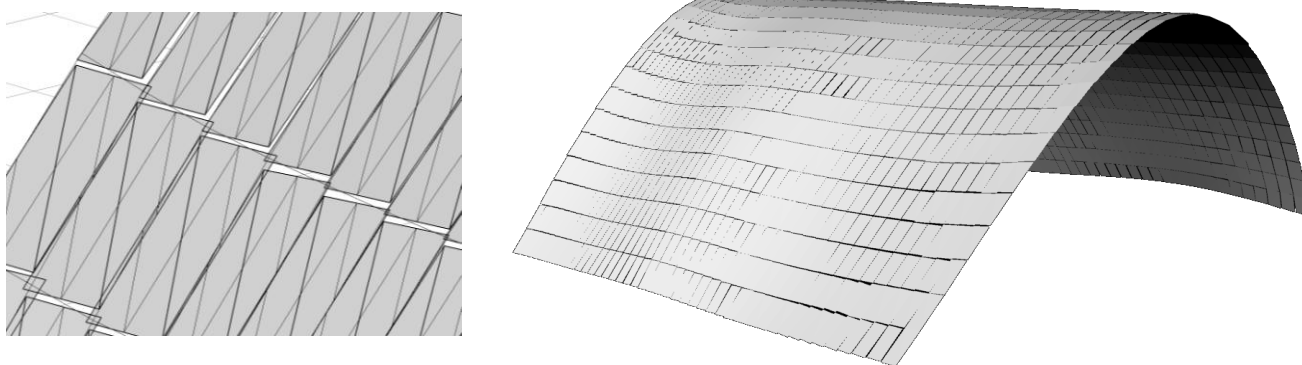


Fig 160. A l'esquerra alguns problemes d'encaix. A la dreta el Render de la solució final de la coberta.

6.2.2 Panells hexagonals regulars

Una altra aproximació al problema és plantejar una malla de panells hexagonals que poden modificar l'encaix entre peces de múltiples maneres per adaptar-se als contorns de la superfície. En aquest cas el sistema ha de treballar amb una malla més complexa i consumeix per tant molts més recursos alentint tot el procés de càlcul i obligant a disminuir la densitat de panells. Els encaixos hexagonals donen molt de joc perquè a diferència de les quadricules on els quadrats presenten poques variants de peça (o bé les formes rectangulars o bé els trapezoides), en les malles de cel·la hexagonal es poden donar moltes més configuracions que poden anar des de l'hexàgon pur a casos degenerats en forma de rectangle, estrella, o altres combinacions. Les forces que actuen sobre la malla són les mateixes que havíem observat en el cas anterior (longitud, planicitat, igualtat) però el comportament i l'espectre de resultats és molt més variat. El comportament de la malla abans i després d'aplicar la funció d'igualtat entre les peces és completament diferent. En general abans d'aplicar aquesta funció tenim una distribució més o menys uniforme de panells hexagonals, però quan apliquem la igualtat en molts casos el que obtenim és un despeçament en una forma d'espiga molt similar al de la volta catalana. Aquest esquema sembla que és la configuració on les forces internes dels panells i les forces de la malla aconsegueixen equilibrar-se mútuament d'una manera més eficaç. Aquest tipus però no l'hem obtingut en un estat pur sinó en configuracions alternatives on els panells prenen formes que van des de la forma en doble Z "X" fins a formes més properes a l'hexàgon.

Per a donar una primera solució vàlida al problema ens centraré en la coberta del mig a la qual donaré una major densitat de malla (20 x 30). Com que tenim prou densitat de peces no ens ha

calgut recórrer a molts tipus de panell i amb quatre n'hem tingut suficient per aconseguir un bon encaix sobre la superfície. En aplicar la funció d'igualtat, en qüestió de segons el sistema ha generat la distribució en espiga establint diferents variants de peça entre la part anterior i posterior de la volta. Aquesta zonificació de la coberta segueix l'esquema que ja havíem vist en el cas de l'anàlisi que havíem fet amb les malles quadrades, però apareixen moltes particularitats pròpies de la malla hexagonal que permeten millorar l'encaix, com intercalar tipus de peces per files, o col·locar peces especials a les vores.

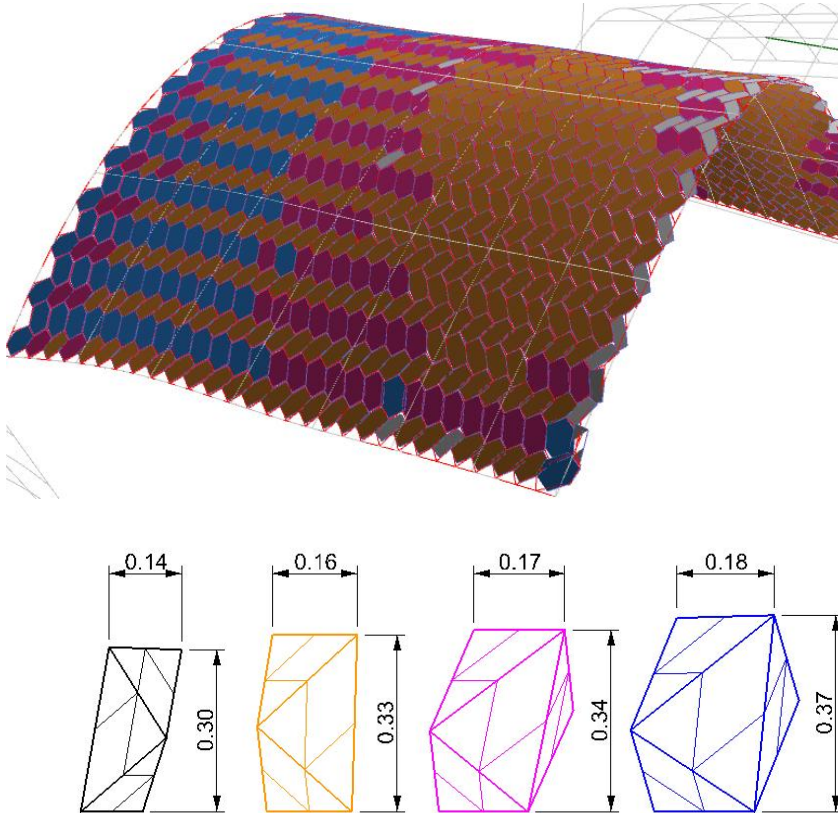


Fig 161. A dalt la disposició definitiva de les peces, a baix les diferents peces que componen la volta.

Si ens fixem en les peces que formen la coberta veurem que tenen tendència a anar des de la forma trapezoïdal la més petita a la forma hexagonal la més gran. D'alguna manera les dimensions i la forma de les peces estan relacionades a través d'algun mecanisme que fa que les que són rectangulars es corresponguin a les zones més estretes i les més hexagonals a les zones més amples. En realitat és un resultat lògic derivat de l'estat de la malla. A les zones més estretes la peça es veu comprimida i si les barres del contorn no presenten deformació plàstica l'hexàgon tendeix a formar rectangles o peces en forma de doble Z. En canvi a les zones més amples les barres es veuen sotmeses a tracció i la malla té tendència a dilatar-se de manera que la peça tendeix a recuperar la forma original d'hexàgon.

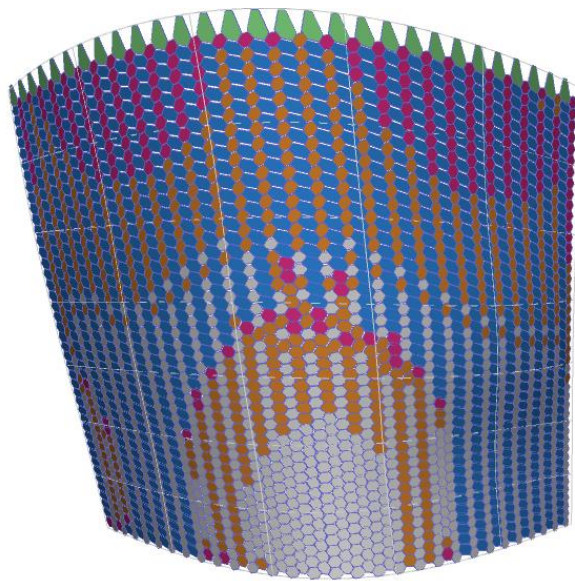


Fig 162. Variant de despeçament de la coberta amb peces intercalades de dos tipus.

Però aquesta no és l'única solució que ens ofereix el sistema dinàmic ja que es pot canviar notablement la solució si alterem les condicions de les forces que actuen en el model, en aquest cas hem pujat la densitat de la malla i s'han augmentat a 5 el tipus de peces. En la configuració resultant el sistema genera dos conjunts de peces intercalades entre elles, unes de petites (peces taronges i blanques) i unes de grans (peces blaves i

liles), i de cadascuna en fa dues variants segons el cas. La disposició en espiga perd força respecte a una disposició en malla hexagonal clàssica, però amb l'excepció de que els hexàgons no són iguals sinó que es divideixen en 2 grups clarament diferenciats. A més d'això ha creat una peça especial per al cas de la vora (peça verda). Tal com ja hem vist en el primer cas en estirar la malla les peces tenen tendència a tornar-se més hexagonals. Però aquest fenomen també té lloc quan la malla experimenta poca curvatura, cas en el qual té tendència a romandre en l'estat original d'hexàgon. Això ha potenciat que la malla romangués en configuracions més hexagonals per dos factors, la major densitat ha fet disminuir la curvatura relativa de la superfície respecte la malla, que al seu torn s'ha vist menys estirada, i l'augment de tipus que ha donat més capacitat de joc al conjunt fent que les peces no es vegin tant forçades. Degut a aquests factors la configuració rectangular de les peces s'ha vist molt reduïda i això ha desvirtuat la configuració en espiga. En conjunt, doncs, és una estratègia diferent nascuda d'un canvi en les condicions dinàmiques que demostra la capacitat generativa del mecanisme.

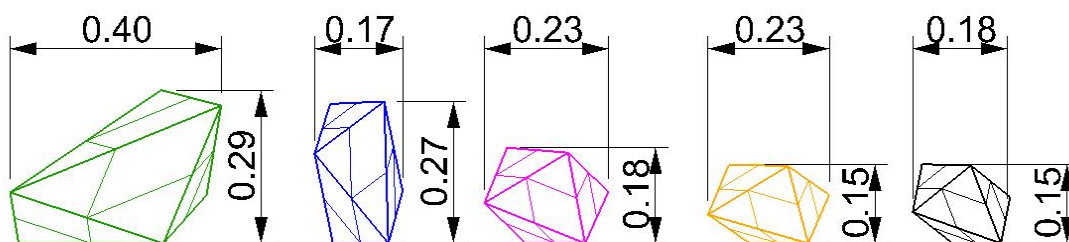


Fig 163. 5 tipus de peça amb les quals es pot generar aquesta coberta.

6.2.3 Anàlisi del resultat

Per comprendre per què el sistema ha donat aquesta solució i poder dir si és la millor cal entendre en quins termes s'ha plantejat el problema i amb quins criteris s'ha resolt.

En primer lloc la geometria es manté per la interacció dels camps força que actuen en el model. En aquest context la malla s'ha d'entendre com un conjunt de vèrtex que es relacionen entre ells mitjançant forces de distància i forces que mantenen la planicitat de cada cel·la. Un cop definida la malla, aquesta s'ha de combinar amb una superfície complexa de manera que les forces de la malla s'adaptin a la superfície. Quan el sistema ha establert un equilibri de forces això es tradueix a nivell geomètric a una forma resultant que compleix totes les condicions geomètriques derivades de les forces (que siguin planes, que siguin iguals, que s'ajustin a la superfície, etc.). Així les formes de les peces resultants són la configuració formal en la qual la geometria presenta una menor tensió i per tant on la forma és més adequada per equilibrar els diferents estats tensionals. La inexactitud del resultat es pot mesurar en forma d'energia potencial en cada vèrtex perquè tot i que el model quedi equilibrat, això no vol dir que no hi hagi estats de tensió interns. Un resultat exacte és aquell que no presenta estats de tensió interns mentre que un resultat inexacte presenta el cas oposat.

En el cas de la quadricula la millor solució per a la malla ha estat el panell trapezoïdal ja que aquest ha equilibrat les forces que sobre ell actuaven de manera estable i per tant sense un excés d'energia potencial. Com que les malles en quadricula són molt rígides i donen poc joc en l'encaix entre les peces la morfologia d'aquestes és poc variada i només obtindrem rectangles o trapezoides. L'única diferència substancial entre la peça rectangular i la peça trapezoïdal és que aquesta última té menor superfície de manera que se'n poden encaixar més en un mateix àmbit. Això pot donar-se degut al fet de que o bé la superfície presenti una important curvatura (en relació a la dimensió de la peça) o bé la malla es vegi comprimida en el contorn donat.

La malla hexagonal és molt més flexible morfològicament que la quadricula i ofereix moltes més combinacions geomètriques en l'enllaç entre les peces. Així, doncs, la varietat de resultats pot ser molt extensa perquè el sistema ha pogut equilibrar el conjunt de forces jugant també amb el tipus d'enllaç i això ens ha permès obtenir la configuració en espiga i les seves derivades. Un factor important és que efectivament la junta en forma d'espiga tradicionalment s'ha fet servir per a les voltes de doble curvatura i això pot tenir relació amb el fet que el sistema trobi que la combinació on menys tensió es genera en la present coberta sigui precisament aquesta. Aquest fet ajudaria per una banda a entendre la tradició i per altra a validar aquest mecanisme com un sistema de recerca de solucions adequades a nivell formal.

Perquè es generi l'espiga la malla hexagonal ha d'estar composta per barres rígides sense deformació plàstica i cal que aquesta malla estigui comprimida per totes bandes o bé que es trobi

amb una curvatura molt accentuada, llavors es pot observar que les barres tendeixen a la configuració en espiga perquè curiosament en aquesta configuració tot i que les peces tenen el mateix perímetre que en la malla hexagonal original tenen un 20% menys de superfície de manera que es poden posar més peces per a un mateix tram i per tant es pot adaptar molt millor a les curvatures. Encara més accentuada és aquesta tendència quan la peça passa a tenir forma de llaç, en aquest cas la superfície pot arribar a ser de només un terç de l'hexàgon original i per tant és la configuració de malla hexagonal que permet una major densitat de peces per tram de superfície. Aquestes mateixes tipologies de panell s'han obtingut per mitjans geomètrics aplicats a formes còncaues i convexes ¹⁸⁰, com es pot veure el sistema dinàmic ha generat aquests mateixos resultats a partir d'interaccions purament dinàmiques i sense la introducció de complexes fórmules matemàtiques en temps real.

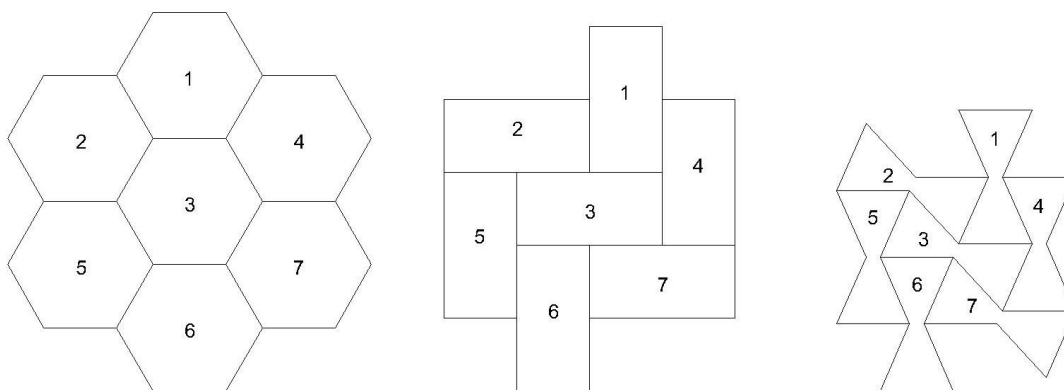


Fig 164. Evolució de la malla hexagonal en el procés de compressió. El contorn de les peces és igual en tots els casos però la superfície es redueix clarament del primer a l'últim cas. Quan el sistema dinàmic necessita situar més peces en una zona fa servir aquest recurs.

6.3 Optimització de sistemes tèxtils i malles tènsils

Tal com hem vist anteriorment el plantejar sistemes de simulació física ens dona la capacitat inherent de simular estructures tènsils a partir de mecanismes molt senzills. També de cara al control d'aquestes estructures els sistemes de simulació física permeten produir modificacions en temps real de manera que el treball sigui més àgil i la comprovació més ràpida. En aquest sentit l'aplicació desenvolupada permet treballar a fons amb idees com les que plantejava Frei Otto en generar una malla tènsil amb estructures de panells de metacrilat en cadascun dels forats. Aquest plantejament pot ser fàcilment simulat a partir de generar una malla tènsil amb panells

¹⁸⁰ Pottman, H., Asperl, A., Hofer, M., Kilian, A., *Architectural geometry* 2007, Bentley institute press **P.705**

plans a les seves cel·les i unes condicions formals determinades. Aprofitant també les capacitats del programa per visualitzar estats de tensions podem comprovar com treballarà el sistema funicular, on acumularà més tensions i per tant on hem de reforçar l'estructura.

6.3.1 Malles de barres rígides

Les simulacions més senzilles consistiran en reproduir el comportament d'una malla suportada per una sèrie de punts en la qual trobem barres de connexió rígides. En aquest sentit seria un cas en el qual el conjunt es comportaria com una tela penjant d'un màstil. En aquest cas la malla es deformaria en aplicar la força de la gravetat.

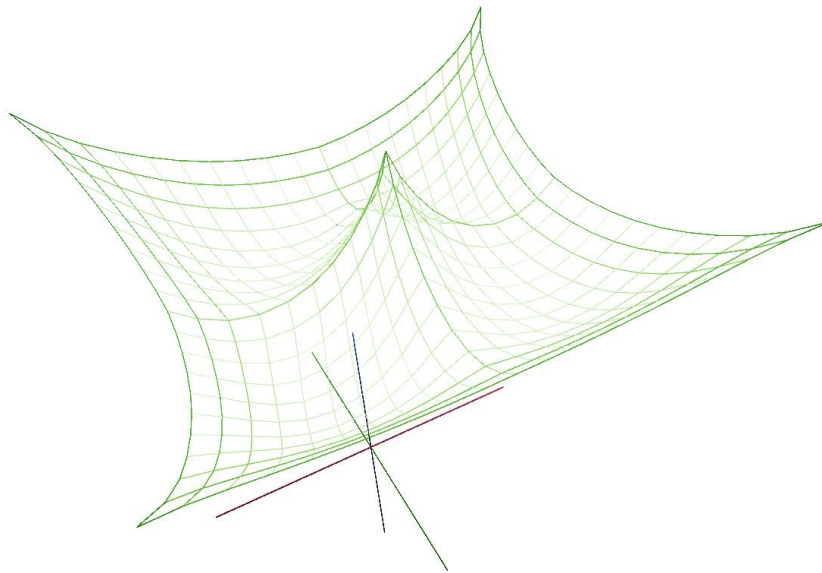


Fig 165. Malla no elàstica suportada per 5 punts en la qual podem veure on hi han les majors tensions.

A la figura hem visualitzat l'estat de tensió a que es veuen sotmeses les barres que formen la malla, de l'anàlisi d'aquestes tensions podem observar que les més importants es donen a les vores de la tela i en els eixos principals de manera que aquests punts caldria reforçar-los en cas de voler cobrir una superfície amb una malla tèxtil d'aquestes característiques. En aquest cas al no ser superfície mínima, les carregues que ha de suportar la malla són heterogènies cosa que pot ser un avantatge o no segons el criteri de l'arquitecte. Encara que no disposem de dades reals de resistència de materials podem preveure que si generem una tela d'aquestes proporcions la deformació en entrar en càrrega serà similar i caldrà reforçar els eixos principals així com les vores perquè són els punts on més tensió es genera. Aquesta malla és extremadament senzilla de manera que podem comprovar el funcionament esquemàtic. Però aquest mateix mecanisme el podem aplicar a casos molt més complexos cosa que ens pot

ajudar a entendre la potència del sistema. Qualsevol malla amb qualsevol morfologia pot ser simulada amb aquest sistema i oferir resultats igualment precisos. Tot i que és arriscat es podria dir que si el sistema funciona en casos senzills en principi hauria de funcionar en casos complexos a no ser que es donin situacions excepcionals per les quals el sistema no està preparat.

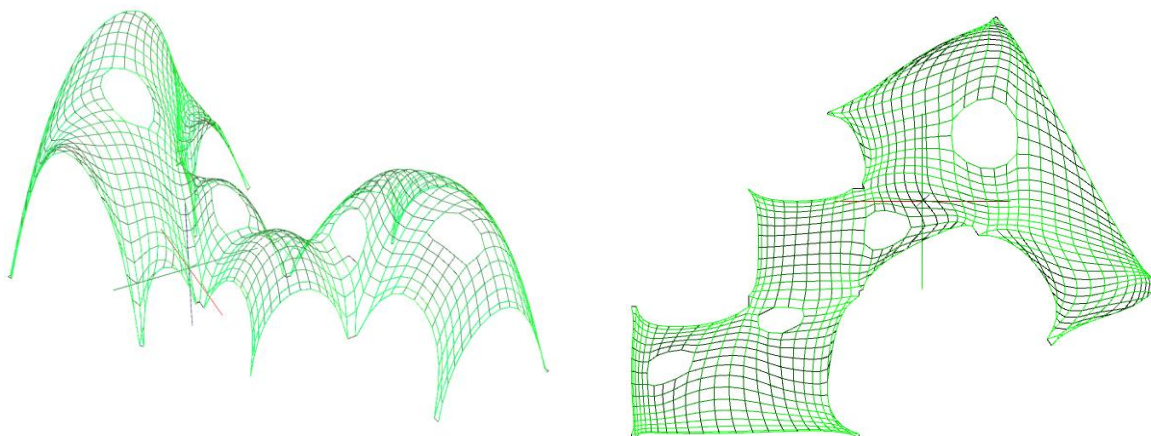


Fig 166. Malla no elàstica de contorn complex en la qual podem observar els estats de tensió. A diferència d'altres casos presenta obertures que desvien les accions del seu curs natural per la malla.

A partir del mateix principi que el cas anterior hem plantejat una malla similar però amb un contorn molt més elaborat de manera que la forma resultant és més complexa. Tot i això el sistema treballa igualment amb molta comoditat, produint canvis en temps real que l'usuari pot anar seguint sense dificultats, i mostrant l'estat de tensions de la malla com varia a mesura que es succeeixen els canvis en el model. En aquest cas de nou el sistema ens indica on es donen les majors tensions i ens permet preveure quines parts caldrà reforçar i en quin sentit ho haurem de fer perquè si ens fixem atentament veurem que hi ha zones on no totes les barres presenten la mateixa tensió sinó que aquesta depèn del sentit d'actuació. Això vol dir que de la mateixa manera que passa amb les peces de roba grans, es generen espontàniament zones on la malla actuarà com una volta i altres en que treballarà com una cúpula. Cada cas requerirà un tipus diferent de reforça que es pot preveure amb aquest mecanisme. L'obertura de forats també ha generat peculiaritats en el comportament tènsil perquè ha redistribuït les tensions al voltant dels forats esquivant la pèrdua de resistència que han suposat. Normalment l'obertura de forats té un cert impacte en la distribució de les càrregues, quan el sistema està treballant com una volta els arcs immediatament anteriors i posteriors (en el sentit de la volta) al forat augmenten la seva càrrega mentre que els arcs tallats pel forat presenten una pèrdua clara de tensió. Quan el sistema treballa com una cúpula en canvi tot el contorn del forat també treballa de manera que actua com un òcul estructural. Finalment les vores de la malla també presenten importants estats

de tensió en ser les encarregades de tancar la membrana tènsil com ja fan els cèrcols en una estructura.

6.3.2 Malles de superfície mínima

Per generar una malla de superfície mínima només hauríem de definir les barres com elàstiques i afegir tensió interna de retracció de manera que l'estructura es retragui. Amb aquest canvi podem transformar tot el conjunt en una superfície mínima en la qual tots els elements tendeixen a treballar de manera uniforme. Però a diferència del cas anterior, per comprovar l'estat de tensions que tindria aquest element, caldria seguir un procés invers en el qual es transformes la forma obtinguda (superfície mínima) de nou en un element de barres rígides de manera que es pogués observar el comportament real un cop la superfície mínima de tela entri en càrrega. El que canviaria perquè entre un cas i l'altre és únicament la morfologia de la peça de tela, però les barres en tots dos casos actuen de la mateixa manera. Tal com veiem a la imatge el comportament estructural s'ha regularitzat en gran mesura però encara podem observar majors tensions en els punts de suport.

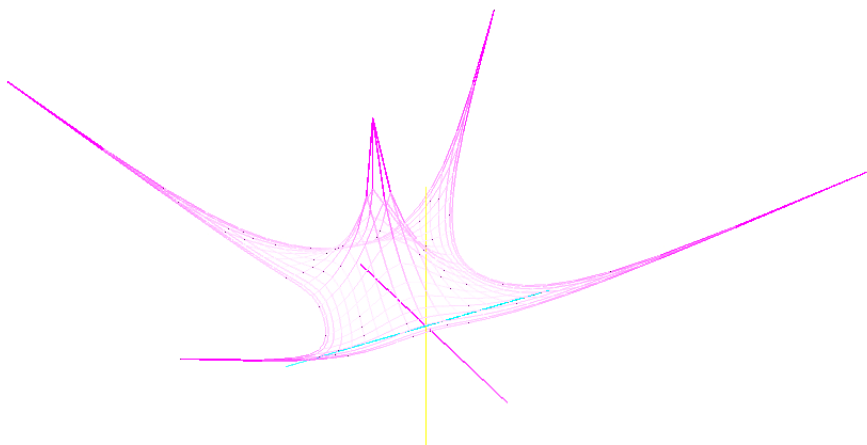


Fig 167. Malla sotmesa a un tensió interna formant una superfície mínima. Un dels avantatges és que ara el conjunt treballa de forma uniforme, però a canvi s'ha reduït considerablement la superfície coberta i amb això la quantitat de material emprat.

Una aplicació interessant d'aquest sistema és obtenir la tela destensada original amb la qual podríem obtenir la superfície mínima que visualitzem en pantalla en deixar-la penjar pels punts de suport indicats a la figura. Per fer això un cop tensada i deformada la malla, eliminariem el comportament elàstic de les barres de manera que actuï com un sistema de barres sense deformació plàstica, i després eliminem la gravetat i els punts de suport de manera que ens queda una malla destensada que si es tensa es correspondrà amb la malla tènsil que hem observat al principi.

Aquest procés invers l'hem pogut reproduir amb el programa dinàmic de manera que hem obtingut un element que dóna un aspecte clarament cedit com quan hem deformat un element

elàstic fins al punt de plasticitat tot deformant-lo de manera permanent. Perquè aquest procés es dugui a terme de manera adequada cal introduir però les dades de resistència del material de manera que les deformacions siguin el més reals possible i en el moment de destensar la malla obtinguem la forma real de la tela. De moment la tensió es pot regular però no hi ha dades de materials introduïdes en el programa de manera que el resultat no és exacte, però ho podria ser.

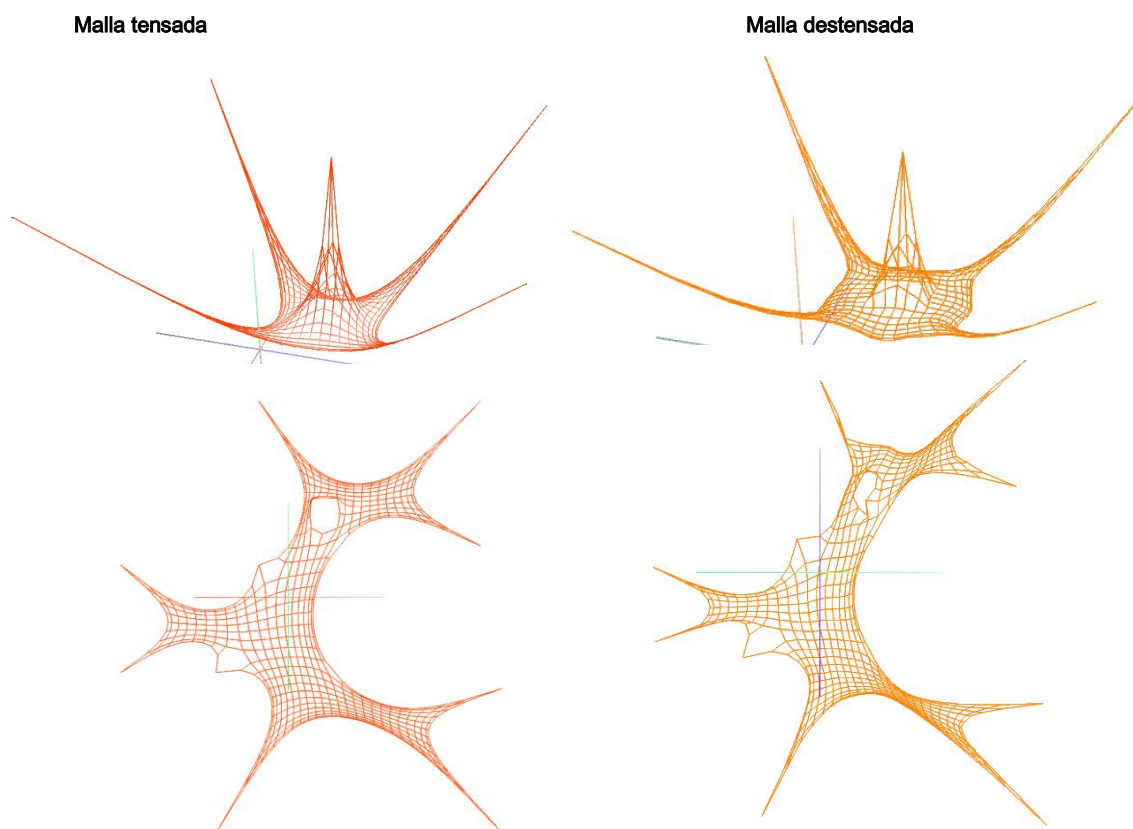


Fig 168. Exemples de malles destensades, a l'esquerra apareix la malla sotmesa a càrrega, mentre que a la dreta apareix la malla un cop s'ha eliminat tota tensió de la mateixa.

6.3.3 Anàlisi del resultat

Els resultats obtinguts posen de manifest les diferències que ja hem observat en els casos anteriors entre les barres que no tenen deformació plàstica amb les que sí. Quan treballem amb barres sense deformació plàstica les càrregues es distribueixen de manera no uniforme, generant voltes, cúpules i altres esquemes de funcionament estructural heterogeni. Per altra banda les deformacions són més realistes perquè simulen l'elasticitat real dels elements seguint

la llei de Hooke. A diferència però de la realitat no hi ha punt de ruptura ni deformació plàstica de manera que sempre tendeixen a recuperar la seva longitud original cosa que en facilita el control. Si en canvi treballen amb cordes que tinguin deformació plàstica i que tinguin una força de retracció interna obtindrem sistemàticament superfícies mínimes. Amb aquest sistema el comportament és molt diferent a la realitat perquè la barra es veu contínuament sotmesa a una deformació plàstica. Així el sistema retrau fins que les forces de retracció són equilibrades per les forces de tracció de la malla. El resultat final depèn en gran mesura de la disposició dels punts de suport i de la intensitat de retracció de les barres, però acaba treballant sempre de manera homogènia fent que totes les barres es vegin igual de tensades (el mapa de tensions una eina inútil en aquests casos). Un dels punts on aquest fenomen es veu especialment accentuat és en les barres que formen el contorn de la malla i que, com hem vist en el cas de les cordes rígides, són dels punts que més tensió suporten. Curiosament en aplicar un sistema de barres elàstiques tendeixen precisament a augmentar molt la longitud del perímetre cap a l'interior de la malla reduint així la superfície de la mateixa fent que les barres del contorn treballin igual que la resta. Aquest fenomen acostuma a fer que les superfícies mínimes, com el seu nom indica, cobreixin molt poca extensió cosa que no sempre ens interessa. L'única manera de compensar aquest fet és generar múltiples punts de suport que obliguin a la malla a estendre's i cobrir una àrea major. El tractament dels forats és un altre aspecte de cert interès perquè implica canvis substancials en el comportament estructural del model. En general totes les malles tendeixen a arrodonir el contorn dels forats de manera que les càrregues hi circulin al voltant com si fossin un fluid. La seva presència desvia notablement la circulació de les tensions per la malla de manera que el comportament estructural de la malla canvia tant en el cas de les cordes rígides com en les cordes elàstiques. Però a nivell formal les transformacions seran diferents en tots dos casos:

1. Si es tracta de cordes rígides el sistema arrodonirà el contorn de l'obertura, però de forma molt poc accentuada, pot ser fins i tot que no prengui forma arrodonida sinó de llàgrima deixant algunes barres sense tensió interna en distribuir les càrregues de manera heterogènia.
2. En el cas de les cordes elàstiques en canvi en repartir les càrregues de manera més uniforme, les tensions es repartiran per tota l'estructura de manera que el canvi de la morfologia serà molt més generalitzat i això farà que les formes siguin molt més suaus, raó per la qual l'arrodoniment de les vores de l'obertura serà més pronunciat que en les cordes rígides.

A més d'això es poden combinar aquestes dos metodologies de càlcul per donar resultats més complexos com malles destensades que ens serveixen per descriure peces de roba que un cop

tensades donin lloc a les formes proposades pel programa. Aquesta capacitat de generar tot un procés de tensat i destensat dins el programa és el fruit del plantejament del sistema com un mecanisme versàtil, pensat de manera generalista i que permeti crear processos a l'usuari de manera senzilla. En aquest sentit el plantejar un CAD de processos dinàmics ha permès dissenyar un procés de forma exclusivament gràfica del que hem obtingut un model. El canvi de mentalitat respecte al concepte de dibuix tradicional es fa evident en aquest cas.

6.4 Altres casos d'aplicació

Paral·lelament a les aplicacions abans esmentades apareixen altres possibles usos del sistema que tenen a veure amb el control de geometries complexes i la capacitat per a imitar el control paramètric dels elements. El sistema tal com està ara plantejat no està adaptat per donar el seu màxim rendiment en aquests casos però es podria adaptar donant lloc a resultats que potencialment podrien ser prometedors. En aquest sentit ha sigut possible detectar aquestes possibilitats gràcies al plantejament dels sistemes dinàmics com una eina d'ús general.

6.4.1 Control d'un esquema estructural

Els sistemes dinàmics han demostrat ser un mecanisme de control molt intuïtiu ja que segueixen unes lleis del moviment que ens resulten completament naturals i amb les quals podem predir fàcilment el comportament d'un conjunt d'elements quan es veuen afectats per una acció. Aquesta propietat permet delegar còmodament la modificació de la major part del model al sistema dinàmic de manera que ens podem estalviar moltes operacions repetitives. De cara al control d'elements de certa complexitat formal els sistemes dinàmics ofereixen avantatges fonamentals que permeten modificar peces complexes de manera eficient. Un dels casos més evidents el trobem en el control de superfícies de malla compostes de panells plans. En aquest cas en un sistema de CAD convencional tindríem seriosos problemes per poder produir modificacions ja que a la dificultat de modificar una malla composta de centenars de punts se li suma el mantenir la condició de planicitat per totes les seves cares. Els sistemes dinàmics ofereixen la possibilitat controlar aquest element a partir de funcions que fan extensives les accions i intencions de l'usuari a tots els punts de l'estructura seguint una lògica que aquest pot controlar. Així es simplifica i s'optimitza el procés de modificació i alhora amplien la capacitat de l'usuari per accedir a geometries més complexes sense perdre'n el control. En aquest cas tractant-se d'una superfície de malla (que tant pot representar un paviment, una coberta, un mur o una lona) cal que el model es pugui manipular en tres dimensions i a més, a causa de que és

un element normalment molt complex, les relacions dinàmiques bàsiques que el controlen s'han de generar automàticament ja que per a l'usuari comportaria un treball excessiu haver-les de definir a mà. El procés general que segueixo per generar un element dinàmic d'aquestes característiques consta de tres passos:

- a) En una primera fase controlariem les opcions predeterminades del programa abans de generar la malla per tal de que quan la generem aquesta s'adeqüés el més possible a les nostres necessitats. La nostra feina es pot veure molt simplificada si d'entrada el model presenta uns punts de control i unes propietats que ens facilitin la feina més endavant.
- b) En una segona fase editariem la malla afegint-hi les funcions, propietats o elements que consideréssim adients per tal d'acabar d'adequar el seu funcionament i establir les relacions geomètriques específiques del nostre cas.
- c) Finalment modificariem gràficament els punts de control i els paràmetres de la malla de cara a modelar definitivament l'element.

El punt crucial en aquest procés es troba en com definim el sistema de control del model de manera que més endavant es transformi de manera adequada ja que si aquest punt no ha estat ben previst la posterior modificació d'aquest mecanisme pot resultar, en algunes ocasions, molt complicada. En aquest punt val a dir que ha estat un gran problema el no haver tingut temps de desenvolupar el sistema de *grafs* amb el qual volíem poder controlar les relacions de manera molt més efectiva. Aquest sistema no representa els elements en la seva configuració real sinó en una configuració esquemàtica en la qual establir relacions és una tasca molt senzilla i el control i reorganització dels camps de força pot tenir lloc de manera molt més efectiva. Controlant, doncs, un simple esquema pots modificar relacions molt complexes dins el model i manipular millor els resultats. De moment però aquest mecanisme cal desenvolupar-lo mentalment i guiar-se pel propi model per generar les relacions adients. També de cara a facilitar la generació i definició del sistema de control hem proposat diferents opcions de configuració anteriors a la generació de la malla de manera que no s'hagi de definir posteriorment.

Per a l'exemple generaré una estructura de barres que consti de tres nivells. Cada forjat estarà format per una malla i una subestructura amb la qual guanyarà gruix i complexitat. Fet això establiré un sistema de control per la mateixa de manera que pugui modificar la forma lliurement a partir dels seus extrems. A continuació li produiré canvis significatius al conjunt a partir dels punts de control de manera que es pugui veure la capacitat del sistema per modificar automàticament l'estructura amb les mínimes indicacions de l'usuari.

Per crear aquest element el primer que hem fet és modificar les opcions de generació de la malla perquè el sistema ens generi un element inicial el més adequat possible. Un cop generada la malla li apliquem una extrusió general de manera que el model guanyi gruix i complexitat. Repetirem l'operació 2 cops més a diferents altures per crear els dos forjats que encara falten. Unirem tots els forjats amb pilars que vagin fins al terra. Per ajudar a mantenir la morfologia dels forjats hem bloquejat el moviment en la direcció Z de tots els vèrtex de l'estructura. Per altra banda hem generat una recta al contorn dels forjats i hem vinculat els punts extrems de cada forjat a la mateixa per mantenir la linealitat de les vores. Per últim hem bloquejat els angles de tots els plans de cada malla a 90° . Fent això obtenim un sistema relativament estable amb el que podrem mantenir l'element controlat en quasi totes les situacions. Ara ens quedarà definir un quadre de control personalitzat per la peça en el qual podrem controlar fàcilment els paràmetres principals. En el moment en el qual totes les forces estan equilibrades i ja tenim definit un sistema de control, podem començar a modificar la figura per adaptar-la a la seva configuració final. En aquest cas però cal vigilar de no produir modificacions massa brusques, perquè en aquests casos es poden produir deformacions que el sistema dinàmic no pot corregir. Tot i això per regla general aquest no és el cas i la facilitat amb la qual un model molt complex es pot ajustar i posar a lloc és prou notable.

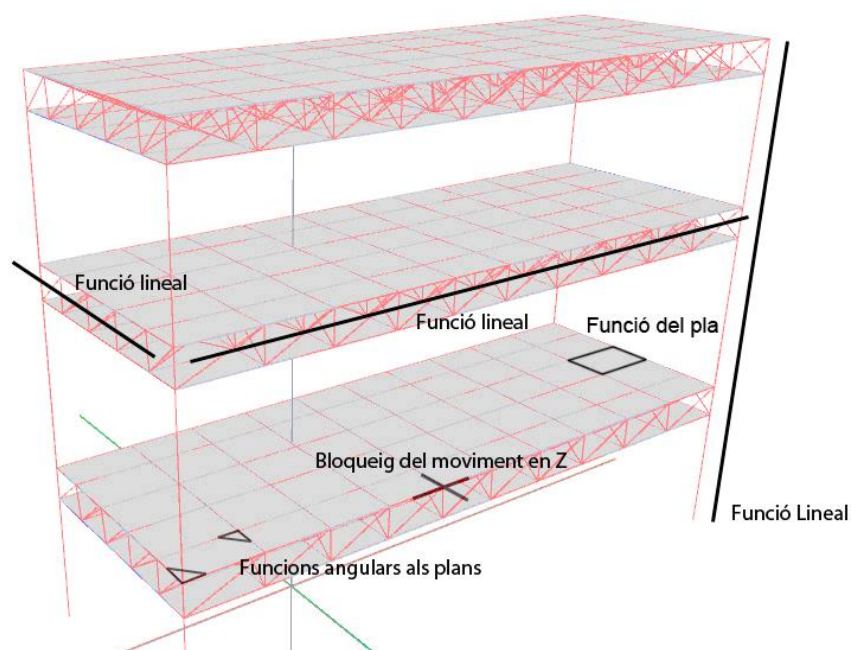


Fig 169. Esquema de disposició dels camps de força en una estructura per tal de retenir-ne el control mentre la modifiquem a través dels punts de control.

Per modificar aquesta estructura es van deixar només 8 punts de control fixats la modificació dels quals afecta a tota la resta dels elements que mantenen les proporcions geomètriques entre ells per mitja dels camps de força. Amb aquest sistema modificar aquest element és torna una tasca extremadament senzilla. En estirar un vèrtex superior o inferior obtenim una deformació

quasi instantània de l'element sense cap esforç addicional de manera que la capacitat per generar propostes és quasi il·limitada. Aquest esquema de control es pot modificar parcialment canviant els vèrtex que queden fixats de manera que també podem controlar l'element a partir d'un punt qualsevol de la vora del forjat o dels pilars.

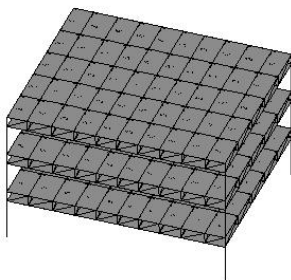


Fig 170. Partint, doncs, la forma inicial que consisteix en una estructura cúbica formada de 4 pilars i 3 forjats simulats a partir d'una estructura de barres, hem generat una sèrie de modificacions movent els 8 punts de control que es corresponen amb els 8 vèrtex de l'estructura cúbica. Aquestes modificacions són simples exemples amb els quals demostrar l'extrema facilitat amb la qual es pot modificar una estructura relativament complexa de barres. Aquestes modificacions tenen lloc en temps real mentre l'usuari treballa i per tant són una eina de treball activa que pot participar d'un procés creatiu o d'un procés més elaborat de desenvolupament tècnic. Aquestes modificacions però no tenen valor estructural perquè estan pensades de cara a posar de relleu la capacitat de control i no de comprovació estructural.

6.4.1.1 *Variants de la figura original*

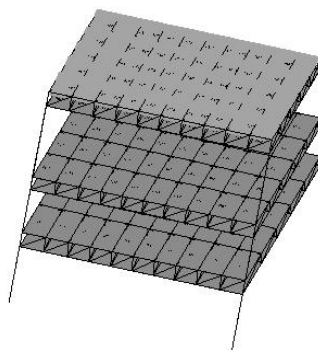


Fig 171. Una primera modificació ha consistit en avançar la posició de la base dels pilars de la part frontal de l'estructura, això ha produït un estirament dels forjats en correspondència amb la nova inclinació dels pilars que gràcies a les funcions lineals no han perdut la seva linealitat. Les malles s'han estirat mantenint la seva ortogonalitat, de manera que totes les seves parts han crescut de forma coordinada sense fer entrar cap força en conflicte. És important indicar que per poder fer això ha calgut que les barres fossin completament elàstiques amb deformació plàstica però amb molt poca o gens de retracció. Això ha permès que s'estirin o s'escurcin segons el cas sense entrar en conflicte amb altres accions.

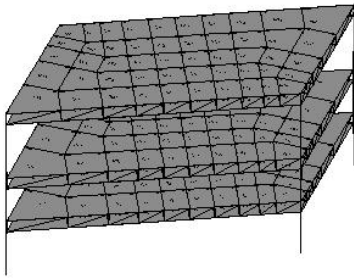


Fig 172. Una altra modificació similar però que ha comportat un tipus completament diferent de transformació és la que ha avançat dos pilars del mateix costat formant un trapezi. Aquesta transformació només ha requerit desplaçar quatre vèrtex (corresponents a la cara de l'estructura) uns metres endavant. En fer això però s'ha generat un conflicte dins de les malles perquè aquestes tenen la funció angular que manté tots els angles dels panells a 90°. En canviar la forma del contorn de les malles d'un rectangle a un trapezi aquesta condició no s'ha pogut mantenir i s'ha generat tot el conflicte que podem observar a les vores del trapezi, sent únicament la part central la qual pot mantenir la seva ortogonalitat mentre les vores generen un seguit de peces híbrides. Aquest fet es pot evitar disminuint la intensitat de les forces angulars.

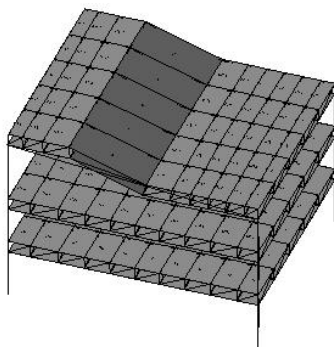


Fig 173. Una ultima prova ha consistit en canvia l'altura dels pilars laterals i una part del forjat superior creant un graó o rampa. Com que el moviment en la component Z dels punts està bloquejat el fet de canviar l'altura d'una sèrie d'elements de la malla no ha comportat que aquests arrossequin tots els altres vèrtex de la malla a canviar la seva altura. Això ha preservat la presència tant marcada del canvi de nivell. La inclinació de la coberta superior la podem controlar bloquejant els 4 punts situats als extrems de la part en desnivell de manera que podem controlar-ne la inclinació.

Així, doncs, a partir del model inicial podem realitzar tota mena de modificacions que donin lloc a tantes variants com vulguem. Aplicat a les estructures ens pot ser de gran utilitat a l'hora de replantejar un disseny quan hagi patit canvis considerables en obra de manera que no calgui modelar tot l'edifici reiteradament. També ens pot ser útil per modificar l'estructura en la fase de disseny en la qual necessitem modificar àgilment tot el model i experimentar amb la major varietat de casos possible. Tot aquest procés estalvia una feina considerable a l'usuari que es veu alliberat de les tasques més rutinàries de modificació per focalitzar-se en aspectes més essencials del projecte. Tenint en compte que l'objectiu del programa era purament experimental, ha demostrat una notable capacitat per dominar elements de gran complexitat geomètrica encara que no estigués específicament programat per aquesta finalitat. Això demostra que de forma natural el sistema ja permet avantatges significatius respecte als sistemes de CAD i per tant una versió més avançada i directament enfocada al modelatge pot incrementar molt aquestes propietats.

6.4.1.2 *Anàlisi del resultat*

En observar els models obtinguts a través de mecanismes dinàmics, descobrim que hi ha certs aspectes del resultat que l'usuari no ha escollit directament perquè superen la seva capacitat de modelar i els ha de delegar al sistema. Aquest fenomen implica una pèrdua de control dels aspectes particulars del model a canvi de guanyar la capacitat d'establir un control general. Aquesta tendència neix de manera espontània en treballar amb mecanismes dinàmics i en general també apareix en molts programes de modelatge de tipus B. I. M. o paramètric. Tot i que pot semblar que això impliqui una menor capacitat de disseny per part de l'arquitecte en realitat la capacitat de disseny és la mateixa per dues raons. En primer lloc el sistema dinàmic pot tornar-se estàtic en cas de necessitat i els aspectes particulars del model es poden modificar directament. Però cal dir que aquesta tasca pot ser fàcilment destruïda pel sistema de control general i en aquest sentit les modificacions particulars han de ser enteses com un procés final, preo no com un procés de desenvolupament de la idea, per això es fan servir funcions generals. En segon lloc, les solucions constructives que vénen imposades pel sistema constructiu no són un impediment a la creativitat en arquitectura, al contrari, són una ajuda per aquesta, perquè ens permet disposar de sistemes ja resolts amb els quals plantejar els nostres projectes de manera coherent. Això li permet a la nostra ment dissenyar amb major llibertat. De la mateixa manera el fet de delegar certes decisions al sistema dinàmic no té per què ser una limitació sinó al contrari un estímulo i una ajuda que ens permeti atacar el projecte d'una forma més eficient amb un major ús de les automatitzacions. En conclusió no hi ha pèrdua de control, simplement es cedeix el control particular del model i es guanya el control general.

En els tests on hem experimentat amb el control d'una estructura 3D es pot observar que alguns aspectes han estat clarament delegats als sistema. En el segon cas, en el qual apareix un decalatge dels pilars laterals que suporten l'estructura, observem que la malla ha generat de forma autònoma una redistribució de la quadricula en la qual ha creat peces especials als extrems per resoldre l'encontre entre aquesta i la vora en diagonal. La morfologia d'aquestes peces d'encontre és irregular i no ha estat decidida per l'usuari sinó per l'equilibri dinàmic entre les forces angulars i les diagonals dels perímetre. La modificació d'aquesta morfologia de panells de manera particular no és recomanable ja que serà probablement destruïda pels sistemes de control general si ho intentem fer durant la fase de desenvolupament de la idea. En aquest cas seria convenient adaptar-se al resultat que ofereix el sistema i plantejar el nostre projecte d'acord amb aquests principis. Igualment és possible exportar el resultat i modificar-lo directament en un

sistema CAD però de nou, si més tard realitzéssim un canvi general en el model hauríem de tornar a fer totes aquestes modificacions particulars.

Un altre exemple similar el trobem en el tercer cas d'estudi on podem observar un canvi d'altura en l'últim forjat i veiem que l'angle que es forma entre un nivell superior i l'inferior l'ha decidit el sistema generant peces rectangulars a banda i banda i deixant una pendent relativament suau entre tots dos nivells. Aquesta pendent es pot correspondre amb una coberta o amb una rampa i per tant no sempre ens interessarà qualsevol inclinació. En aquest últim cas es podria corregir aquesta solució amb molta facilitat bloquejant els punts dels extrems del tram en pendent en la posició que ens convingui. Fent això controlem la morfologia dels panells situats als laterals del tram inclinat i la inclinació del mateix.

Així, doncs, la capacitat de modificar la solució que ens ofereix el sistema dinàmic és quasi sempre de caire general i per tant hi ha aspectes particulars que queden fora de la nostra capacitat de control. Caldrà, doncs, adaptar-se i avançar en la capacitat d'integrar les solucions del sistema dinàmic en els nostres projectes o fer que aquestes s'ajustin per regla general a una solució estàndard si els volem fer servir activament en la fase de disseny.

6.4.2 Control de geometries planes

A l'exemple parteixo d'un model de planta i hi vinculo els elements geomètrics que la componen a partir de camps de força perquè mantinguin certes proporcions entre ells de manera automàtica. Quan modifiquem aquesta planta les relacions establertes es mantindran de manera que podrem delegar en el sistema la comprovació geomètrica de certs aspectes del model mentre ajustem la resta. El més difícil de tot el procés és saber crear un sistema que controli el model de manera coherent ja que en tenir un sistema genèric que ens permet crear qualsevol tipus de relació paramètrica entre elements geomètrics els possibles mecanismes que podem crear són quasi infinits i per tant trobar el més apropiat per a la tasca que ens interessa és més complicat del que podria semblar.

El procés que hem seguit per generar un element paramètric consta de tres fases:

- a) En un primer moment es genera un model descriptiu esquemàtic de l'element descrit al qual li hem assignat les propietats dinàmiques adients perquè es pugui deformar lliurement de manera que s'adapti sense dificultats a les condicions geomètriques que li imposaré.

- b) En segon lloc hem plantejat i dibuixat un mecanisme de relacions dinàmiques que mantinguin certes distàncies, angles o altres aspectes en relació mútua de manera que el model compleixi una sèrie de condicions geomètriques. En aquest punt el model comença a deformar-se per complir totes les condicions establertes.
- c) Finalment modificant els paràmetres de les relacions geomètriques anem produint modificacions en el model de manera que la modificació d'un sol element afecta a tot el conjunt sense que l'usuari s'hagi de preocupar per encaixar geomètricament de nou les dades.

En el punt "a" només fem servir eines de dibuix convencional per generar un dibuix vectorial del model. En aquest cas cal preveure que el model es veurà sotmès a l'acció de forces dinàmiques i per tant cal mantenir una certa coherència en tot ell de manera que més endavant no hi hagin imprevistos com falses unions, superposicions de barres, etc. No caldrà mantenir les mesures estrictes ja que les funcions dinàmiques seran les encarregades de corregir el model. Fet això passem al punt "b" en el qual entren en acció les funcions dinàmiques amb les quals establim les relacions entre els diferents elements geomètrics per tal que retinguin certes propietats geomètriques i al mateix temps que ens facilitin el procés d'edició. Aquest procés és potser el més complicat ja que implica una certa capacitat de previsió i experiència sobre la manera com es comporta el sistema. Podem, doncs, anar establint gràficament aquestes relacions paramètriques sense haver de passar per complicades funcions de programació. En general utilitzant només la funció de *recta* i la d'*angle* es pot generar una planta paramètrica en la qual un cop dibuixada i generades les relacions dinàmiques pertinents, es vagin introduint dades geomètriques mentre el sistema resol automàticament i per nosaltres com hauria de ser la morfologia del model amb les condicions donades en temps real i sense que l'usuari hagi de començar a resoldre els múltiples problemes d'encaix que comporta el fet de quadrar totes les mesures. Per altra banda el sistema ens permet fer modificacions sobre el conjunt del model modificant únicament una de les dades i deixant al sistema encaixar la resta d'acord amb aquesta. No cal dir el temps que es pot estalviar fent servir aquesta metodologia de treball. Però a més aquest mecanisme si per una banda ens estalvia la feina de resolució i dibuix geomètric per l'altra ens permet repartir els errors en la presa de dades per tal donar una solució que sigui el promig de les dades preses encara que aquestes siguin contradictòries entre elles. Tot i que notarem que hi ha contradiccions per la presència de tensions en el model, i això ho podrem visualitzar, no per això ens deixarà de donar la solució vàlida que més s'aproximi al compliment de totes les condicions que haguem establert. També és important el fet de que podrem donar prioritat a una mesura o a un angle determinat simplement augmentant la intensitat de la seva acció sobre el conjunt del model, ja sigui mitjançant el dial d'intensitat o augmentat la massa de

les partícules sobre les quals actua, podem donar prioritat a un aspecte que considerem clau i així establir una jerarquia en les mesures i condicions del model.

6.4.2.1 Encaix bàsic d'una planta

L'exemple exposat és un graner del que en vaig prendre mesures per fer-ne un aixecament. Aquest està situat a suïssa a uns 30 quilometres de Ginebra molt a prop de la població de La Rouches-sur-Fon. Per fer-ho hem recorregut a una estratègia que ens ha estat de gran utilitat i que ens ha permès generar ràpidament un control paramètric de l'element. En un primer moment havíem intentat generar manualment tots els angles i distàncies que volíem mantenir, però això ens va resultar molt tediós i els resultats no eren ni molt menys els esperats, perquè el model "s'arrugava" de manera quasi sempre descontrolada i el control era extremadament difícil. Llavors vàrem aplicar una estratègia en la qual fem servir la funció que permet detectar àrees internes per generar plans a tots els espais tancats per línies (inclosos murs, sales, finestres, etc.) i després aplicar una altra funció que posa angles fixats a tots els plans de manera que tots els angles ens queden immediatament fixats a partir de dues operacions. Acte seguit esborrem els plans i deixem les funcions angulars. Un cop fet això vàrem transformar en adaptatives algunes de les línies de manera que el model pogués créixer en certes direccions en canviar alguna de les mesures fixades, vàrem introduir les mides reals a les mesures fixes de l'element i també vàrem deixar que el sistema proposés una solució.

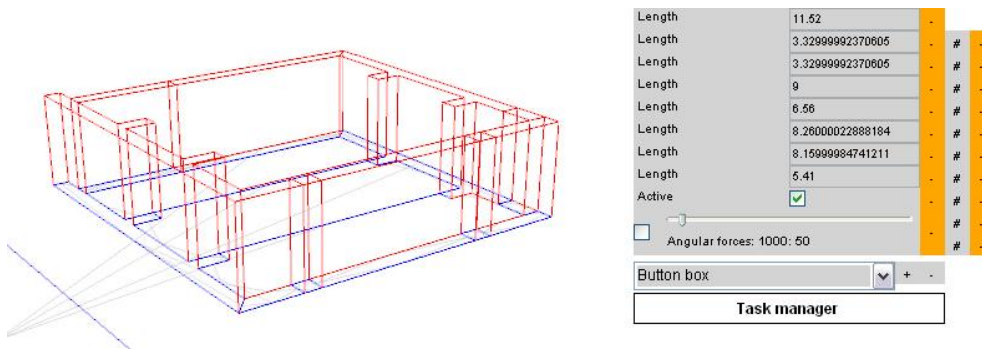


Fig 174. Exemple en el qual es pot veure el model obtingut i el quadre de control paramètric d'aquest.

Tal com veiem a l'exemple hem pogut introduir una planta senzilla i la hem transformat en un element paramètric fixant tots els angles i establint unes **rectes** que tinguin mesures variables i altres que tinguin mesures fixes. El quadre de control l'hem generat amb el programa i ens permet aïllar propietats concretes del model i generar una taula especial de control. A partir d'aquest quadre puc controlar propietats concretes del model, de manera que aquest es pot

modificar a partir de la taula¹⁸¹. Aquest mecanisme ens permet generar elements paramètrics mentre modelo de manera que manualment passem del dibuix geomètric al control paramètric sense més dificultats. Així variant les longituds fixades al quadre de propietats podem modificar la morfologia de la planta imitant el que altres programes estan fent amb sistemes de modelatge BIM o les associacions que genera *Grasshopper* a Rhino. En aquesta figura cal entendre que els **angles** són essencials ja que permeten no només que els elements siguin ortogonals entre ells si-nó que a més el conjunt es pugui orientar segons una recta tal com veiem a la última imatge. Tot i que l'exemple està basat en una planta que sembla ortogonal, la major utilitat d'aquest sistema es trobaria precisament en plantes que no són ortogonals com és el cas de masies i edificis històrics en els quals l'ortogonalitat no està mai assegurada. En aquests casos deformar l'objecte pot ser molt complex i el sistema dinàmic permet fer-ho de manera molt més eficient.

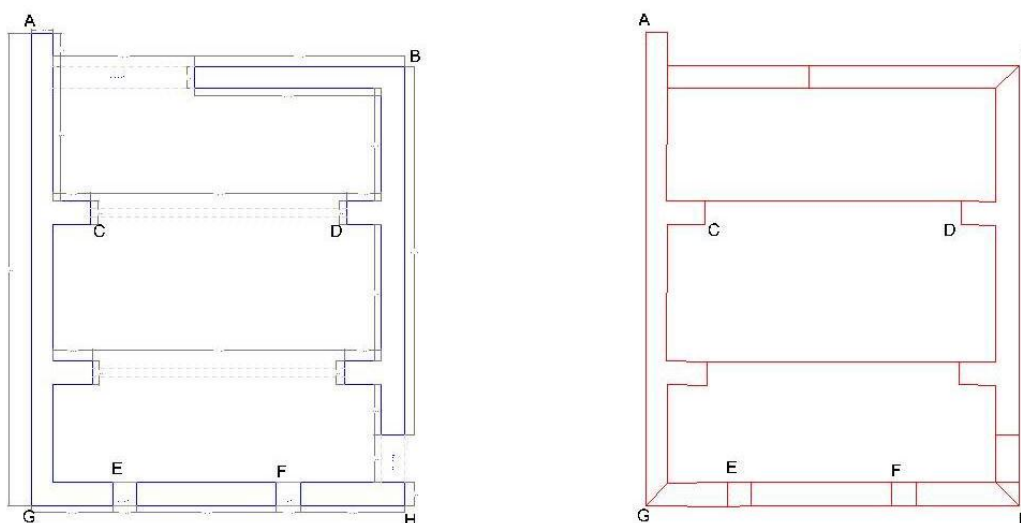


Fig 175. En la comparació tenim per una banda el model fet amb Autocad a partir de les mesures preses i en segon lloc el model obtingut amb el sistema dinàmic a partir de les mateixes mesures. Com podem veure els resultats són pràcticament idèntics. Es poden però quantificar les desviacions que es mouen en valors al voltant dels 2 cm com a màxim.

6.4.2.2 Anàlisi del resultat

De cara a la comprovació del sistema cal alguna mena de mecanisme per avaluar el resultat. Un primer criteri que hem escollit és el de comparar la planta obtinguda amb el sistema dinàmic i la mateixa planta feta amb un sistema de CAD. Les distàncies entre els seus vèrtex seran l'error que m'està donant el sistema dinàmic quan encaixa la planta. Cal tenir en compte però que aquest error no és acumulatiu sinó que depèn de la precisió amb la qual actuen les forces. En els

¹⁸¹ Veure annex 3, vídeo 04

casos actuals les fórmules no han estat adaptades per aquesta funció de manera que obtenim un resultat "cru" en el sentit que el sistema únicament ha explotat la capacitat natural per resoldre el problema plantejat sense més elaboració posterior sobre la fórmula. Cal indicar que les mateixes funcions que estan resolent aquesta planta són les que resolen una malla tènsil o les que defineixen una superfície de panells.

Punt	Desviació	Unitats
A	2.20	cm
B	2.10	cm
C	0.60	cm
D	0.70	cm
E	1.20	cm
F	0.80	cm
G	1.80	cm
H	1.80	cm

En comparar les distàncies podem veure que les diferències es mouen de l'ordre de 2 centímetres per distàncies de 4 o 5 metres. En aquest sentit tot i que són notòries es poden ajustar augmentant la precisió amb la qual les forces actuen, cosa que equival a reduir la unitat de temps considerada per cada iteració, de manera que la simulació sigui més lenta però més exacte. En qualsevol cas diferències de l'ordre de 2 centímetres en arquitectura comencen a ser acceptables i més tenint en compte que en un sistema elaborat aquesta diferència es pot reduir.

7 Conclusions

En plantejar la tesi ens vam fixar una sèrie d'objectius destinats a demostrar la viabilitat d'un sistema dinàmic de treball aplicat de forma general a l'arquitectura. A partir del desenvolupament de cadascun dels apartats, s'avalua la funcionalitat del sistema dinàmic aplicat a diferents casos. A mesura que anàvem desenvolupant l'estudi ens vam adonar que aplicar mecanismes de simulació física no només implicava l'ús d'una nova eina, sinó que requeria d'una metodologia nova de treball que fos capaç d'aprofitar, d'una manera més eficaç, les potencialitats del sistema i, a més, requereix un nou concepte de geometria on les formes deriven de processos subjacents i, per tant, són el resultat de les propietats que els assignem i no al revés. En aquest sentit, ha estat necessari fer un programa que ens permeti comprovar tots aquests aspectes directament. També s'ha destacat que els sistemes convencionals d'interfície gràfica dels CAD tenen una capacitat limitada per treure un rendiment acceptable de les potencialitats dels sistemes dinàmics, de manera que ens calen nous mecanismes visuals adaptats a les necessitats d'aquest sistema. A més d'això, a mesura que avançava la tesi van aparèixer altres aspectes que no havíem previst en el plantejament teòric inicial i que han demostrat tenir una gran importància de cara al control dinàmic d'objectes o la capacitat de disseny que ens pot oferir. Així doncs, l'estudi ens va guiar a una visió més àmplia del problema, i va donar lloc a un plantejament del tema des de diferents perspectives i amb diferents solucions, depenent del camp al qual vulguem aplicar aquesta metodologia.

Hem plantejat les conclusions dividides en dos grups, les que es corresponen amb els objectius inicials de la tesi i les que han aparegut en el desenvolupament i estudi posteriors. Tracten cada tema d'estudi explicant quines han estat les aportacions en aquella matèria i exposant els resultats obtinguts a partir de l'experiència acumulada en l'ús. D'aquests resultats se'n poden extreure unes conclusions quant a funcionament i propietats, que acaben de donar la imatge final d'aquell apartat. En conjunt, obtenim una imatge general del programa i les seves capacitats que ens permet afirmar quines potencialitats reals té aquest sistema i quins aspectes cal desenvolupar per fer-ho possible. Gràcies a això, estudis posteriors en aquesta línia poden acabar de completar els aspectes que encara no han quedat completament desenvolupats i, així, preparar el camp per desenvolupar una eina comercial capaç de donar una funcionalitat aplicada a casos reals. Per altra banda, també s'obren noves línies d'investigació que en aquesta tesi no s'han pogut desenvolupar i de les quals valdria la pena investigar una mica més, especialment en totes aquelles que simulen o donen resultats similars als que observem a la natura.

7.1 Dels objectius inicials de la tesi

7.1.1 Relació amb l'usuari

En el treball que s'ha fet amb la tesi no ens hem vist limitats per la capacitat de resolució dels sistemes dinàmics, sinó per la manca de control sobre aquests i per les limitacions de la interfície gràfica amb la qual es presenten. Aquest és un camp d'estudi que ha quedat paral·lel al de la tesi i que, per tant, no hem desenvolupat a fons però que mereix la màxima atenció per part dels arquitectes perquè és una peça clau del nostre treball quotidià amb sistemes digitals.¹⁸² L'aplicació dels sistemes dinàmics conceptualment implica canvis molt profunds en el plantejament de les eines de treball. La capacitat de combinar accions per obtenir transformacions complexes, o el nou ventall de formes que posa al nostre abast, ens obliguen a replantejar la relació amb l'usuari per tal de fer tot el sistema més entenedor i pràctic. A causa de la poca informació i la manca de control que ofereixen els sistemes convencionals, no podem arribar a plantejar models dinàmics massa complexos d'una manera eficient.

En aquest sentit, en el programa que s'ha desenvolupat hem incidit en un aspecte concret, que és el d'accedir al més ràpidament possible a les propietats dels camps de força per manipular-los amb més facilitat. Concretament, hem desenvolupat un sistema per seleccionar els paràmetres concrets dels elements de treball que volem modificar i posar-los en una barra personalitzada de treball que acaba sent com una barra de control general del model. Aquest sistema ens permet resoldre amb més o menys fortuna un problema concret del control dels camps de força, però hi ha molts altres aspectes a més d'aquest que ens ha estat impossible desenvolupar en aquesta tesi.

Independentment dels aspectes relacionats amb la interfície gràfica hi ha una altra relació amb l'usuari que es basa en la facilitat natural dels humans per comprendre el moviment i l'acció de les forces amb només observar una figura (i, per tant, sense interpretar codi). En general, gràcies a aquesta capacitat el sistema permet establir una comunicació directa amb l'usuari que no requereix d'un procés d'anàlisi ni de pantalles auxiliars. D'aquesta manera, per a elements senzills la comprensió del model és relativament intuïtiva, de seguida entenem quina força modifica cada part i com ho hem de fer per canviar-ne el comportament. Però quan les accions es combinen entre elles el procés de racionalització es complica i deixa de ser directe per basar-se en un procés d'anàlisi conscient i en l'experiència acumulada en l'ús del sistema de qui està modelant. Per regla general, en elements complexos té lloc aquest fenomen i cal saber separar

¹⁸² Campbell, D.A., Wells, M. *A Critique of Virtual Reality in the Architectural Design Process*, 1994, HITLab Tech Report R-94-3 Seattle: University of Washington, Human Interface Technology Laboratory.

les accions que deriven d'una força de les que deriven d'un altra. És en aquest punt on l'experiència té un paper fonamental perquè ens permet interpretar models més complexos de manera que sapiguem quins paràmetres hem de modificar per obtenir l'efecte desitjat. Podríem, doncs, separar el procés perceptiu sobre el model digital en dues fases, la interpretació del que està succeint i la previsió de futures accions per transformar-lo de la manera que ens interessa. En casos senzills els sistemes dinàmics permeten una relació molt directa tal com reflecteixen alguns articles relacionats amb el camp biomèdic.¹⁸³ Però en relacions més complexes, l'experiència que ens dóna aquesta tesi és que si bé la interpretació intuïtiva es pot mantenir, la capacitat de racionalització que ens permet passar a l'acció queda considerablement reduïda i, per tant, calen sistemes auxiliars per facilitar aquest procés de l'usuari o bé una certa experiència.

En conclusió, podem dir que per a models senzills el sistema ha demostrat una gran potència i simplicitat, ha seguit un comportament previsible i ha fet les accions de l'usuari extensives a tot el model sense més dificultats. En aquest sentit, el resultat ha estat prou satisfactori i no han calgut canvis fonamentals d'interfície ni de programació respecte als CAD actuals. Però en elements de més complexitat el sistema mostra dificultats d'interpretació i necessitat de sistemes més avançats de relació amb l'usuari que caldria desenvolupar en investigacions posteriors.

7.1.2 Capacitat de control de geometries complexes

Tot i que la confecció del mecanismes dinàmics de control acostuma a ser una tasca complicada, un cop estan correctament introduïts el control de geometries complexes es pot reduir a uns pocs paràmetres i/o punts de control. Quan aquests es modifiquen, sorprèn la simplicitat amb la qual centenars d'elements es mouen coordinadament i donen lloc a una geometria determinada. Les dificultats més notables es trobem en construir aquest mecanisme de control que ens permeti modificar un model complex de la manera més fàcil possible. Així, cal preveure com afectaran les diferents forces i cal seguir una sèrie de pautes que assegurin uns mínims en la major part dels casos com, per exemple, bloquejar tots els angles i distàncies o bloquejar els nodes extrems de les figures. A partir d'aquests mecanismes, doncs, establim un control generalitzat de la figura de manera que les nostres accions es fan extensives a tot el conjunt d'una manera que nosaltres hem determinat i mantenint certs criteris que no volem perdre encara que el model es modifiqui. En aquest sentit, els sistemes dinàmics amplien la capacitat de control de l'usuari i fan viable el control d'elements que amb sistemes de CAD convencionals no es podrien controlar, com malles

¹⁸³ Hamarneh, G., McInerney, T., *Physics-Based Shape Deformations for Medical Image Analysis*, 2003, SPIE-IS&T Electronic Imaging: Image Processing: Algorithms and Systems, vol. 5014, p. 354-362.

de panells plans amb geometries hexagonals o quadrades. Com a contrapartida, es delega el control dels elements particulars al sistema de manera que aquests es controlen a partir dels camps de força. A diferència, doncs, dels sistemes de CAD convencional, en els quals les particularitats es poden definir durant el procés de disseny, en el nostre cas si no és a través de camps de força no podem induir canvis particulars sobre un element perquè qualsevol canvi puntual quedarà ràpidament eliminat pel sistema de control general. Tot i això, en previsió que alguns cops això pot ser un problema, oferim la possibilitat de bloquejar els nodes a voluntat per tal de conservar el control particular d'elements estratègics i, al mateix temps, aprofitar la capacitat extensiva dels sistemes dinàmics per a la resta d'elements que no vulguem definir en detall.

Una conseqüència de l'ús sistemàtic dels sistemes dinàmics és que el modelatge no facilita la modificació particular dels elements, sinó que en promou la modificació generalitzada i això molts cops implica sobre escriure els canvis particulars a partir d'una norma general. Això provoca la tendència a generar un element neutre que sigui molt versàtil per modificar-lo fins a transformar-lo en allò que necessitem, la qual cosa t'estalvia temps, feina i errors. Així, acostuma a ser més pràctic automatitzar la generació d'algunes estructures bàsiques i treballar amb elements predeterminats que no pas establir un sistema de treball detallat i particular sobre els elements del model. A més, els sistemes dinàmics donen millors resultats en elements predeterminats que sobre objectes directament modelats per l'usuari perquè en aquests últims no es pot preveure com es comportaran fins que no els has acabat i, en el cas que no funcionin, cal revisar íntegrament el model. En canvi, en els models predeterminats, els sistemes de control tenen una funcionalitat comprovada i que no cal definir. Això ja passa a gran escala amb els sistemes BIM on l'usuari treballa a partir de famílies d'objectes i les modificacions cal fer-les a partir de factors específics. També hem observat la mateixa dinàmica en els mòduls d'animació com Lagoa, on es generen elements predeterminats per simular fluids, gelatines, etc.,¹⁸⁴ o en el sistema de Kangaroo o Cadenary Tools, que generalment parteixen de la malla; en tots ells la presència d'elements predeterminats és el comú denominador mentre que el modelatge en detall es descarta per a usuaris no experts.

Però hi ha una altra raó menys evident per explicar aquest canvi en les geometries bàsiques de modelatge i que neix del fet que el concepte de geometria s'entén en el sentit invers, ja que primer s'assignen les propietats i després s'obté la forma. Això inverteix les normes habituals de la geometria clàssica i, per tant, l'aproximació tradicional a la forma deixa de ser funcional. El que necessitem són objectes neutres que es puguin transformar en qualsevol element, com la malla.

184 http://download.autodesk.com/global/docs/softimage2013/en_us/userguide/index.html

En el programa que hem desenvolupat per a la tesi s'han generat, de manera espontània, moltes eines de treball que precisament van dedicades a la generació d'elements predeterminats amb moltes possibles opcions de control, a més d'eines de dibuix preparades per al modelatge en massa d'elements repetitius. A partir d'aquestes eines, hem pogut plantejar ràpidament estructures complexes en molt poc temps i adaptar-les a les nostres necessitats. Tot i que aquesta estratègia ens ha permès resoldre molts problemes, també hem pogut comprovar que caldria estudiar detingudament si és una aproximació vàlida per a la majoria de casos en arquitectura o acabarem modelant els elements de forma particular, perdent així molts dels avantatges que ens oferia el sistema. Cal, doncs, tenir en compte que hi ha elements de l'arquitectura que poden ser difícils de generar a partir d'estructures predeterminades. Aquest problema ja el tenen els sistemes de BIM però d'una manera molt més accentuada, perquè la modificació dels elements és una tasca molt més rígida que en els sistemes dinàmics. Per tant, pot ser que la major capacitat de modificació que ens ofereix aquest sistema elimini aquest problema, i això també dependrà de la nostra capacitat per plantejar un bon mecanisme de control o d'automatitzar la generació d'elements arquitectònics amb quadres de control predeterminats que emulin un BIM amb tots els avantatges dels sistemes dinàmics.

En conclusió, la capacitat de control és excel·lent si el sistema està ben plantejat, però generar un mecanisme de control adequat és generalment difícil la qual cosa es pot superar a partir d'elements predeterminats amb quadres control predeterminats que ens permetin generar elements arquitectònics i adaptar-los al nostre cas. Per altra banda, també s'ha observat que la definició geomètrica perd pes respecte a la capacitat de modificar-la i, en general, hi ha una tendència creixent a fer servir elements complexos i a manipular-los més que no pas a generar-los directament, cosa que també s'observa en altres camps. Aquest canvi respon a una reestructuració profunda del procés de treball i del concepte de geometria.

7.1.3 Capacitat d'optimització de peces

Un cop definit el sistema de control de la nostra figura, el programa té un gran potencial d'optimització perquè la capacitat del sistema per transformar la geometria en estats de tensió li permet resoldre un problema geomètric fent servir un equilibri dinàmic de forces. Gràcies que fem servir un sistema iteratiu de càlcul qualsevol problema es pot resoldre encara que no en coneguem la formulació matemàtica directa (o no en tinguem) i el sistema sempre n'aproxima el resultat més òptim; això li permet resoldre tota mena de situacions i formes. Aquesta aproximació

ja fa temps que s'ha plantejat en la resolució de plantes ¹⁸⁵ i es comença a insinuar com a mètode general de disseny,¹⁸⁶ per tant, l'ús de simulacions físiques és un mètode de resolució geomètrica que ja s'investiga actualment i que en aquest cas apliquem a problemes de pannel·lització, control i disseny del model.

Una de les característiques més interessants dels sistemes dinàmics aplicats a l'optimització de problemes geomètrics és que tots aquells elements que estan en contacte entre ells es resolten de manera integral, no per separat. Això implica que la solució al problema de la geometria s'afronta de forma orgànica, fent que totes les peces treballin en harmonia les unes amb les altres dins el conjunt de la figura. Un plantejament de fórmula directa no és capaç d'afrontar (de moment) la resolució de problemes tan complexos i es veu limitat a casos particulars. A més, la integració d'elements al càlcul de la figura està implícita en el fet de dibuixar-los i, per tant, no cal fer cap mena d'esforç addicional.

Fer servir camps de força també ens dona un altre avantatge, que de vegades és crucial quan volem obtenir un resultat geomètric d'una certa precisió ja que els errors en la geometria es poden visualitzar clarament com a tensions en els elements que formen el model, i identificar així quines són les àrees més conflictives. Aquest sistema ens ha permès visualitzar problemes de planicitat als pannels o problemes de longitud a les barres, i distingir entre traccions i compressions. D'aquesta manera, podem controlar la geometria, els marges d'error i el comportament estructural amb un únic mecanisme i visualitzar ràpidament on tenim els problemes més importants. Controlar els marges d'error amb aquest sistema també és molt més senzill ja que en permetre el moviment permet que hi hagi desplaçaments i desviacions, i si aquests superen un cert límit el sistema ens avisa; en canvi, en sistemes de CAD convencionals es fa difícil preveure el comportament del model quan li apliquem uns marges determinats ja que no detecten col·lisions i són estàtics. Per detectar-les hauríem de fer servir programari d'enginyeria molt més específic i que no està pensat per a la tasca d'arquitecte. Així doncs, amb els sistemes dinàmics en temps real el disseny es pot desenvolupar provant marges d'error admissibles i això dona molts avantatges per fer el millor encaix possible.

Tot i que té una gran capacitat per optimitzar el model, alguns cops el resultat obtingut no té la precisió que desitjaríem. En aquest sentit, es pot resoldre el problema parcialment fent servir un procés d'ajust de les tensions dins el model a partir dels paràmetres que controlen les intensitats

185 M. Harada, A. Witkin, Baraff, D., *Interactive physically-based manipulation of discrete/continuous models*, 1995, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series: 199-208.

186 Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmed, D., Tessier, A., Glueck, M., Khan, A., " Physics based generative design", 2009, Publisher: *Les presses de l'université de montréal*, CAAD Futures 2009, p. 231-244.

de les forces. Per exemple, augmentant la intensitat de la força del pla respecte de les altres podem eliminar els defectes en la planicitat dels pannells. Però altres vegades es donen casos on això no és possible. Així doncs, el problema de la precisió i la manca de control sobre el resultat continua present perquè és inevitable delegar en el sistema la resolució de certs aspectes particulars i l'única manera de modificar el resultat sense interferir en el procés de treball és canviant les propietats dels camps de força que hi participen. En aquest sentit, podem trobar problemes quan la solució que ens ofereix el sistema no ens satisfà perquè no és capaç d'ajustar la geometria fins al punt que nosaltres necessitem. Altres cops cal tenir en compte que el problema plantejat no té solució real i, per tant, el sistema aproxima la solució més adequada però no el resol.

En conclusió, és un sistema de càlcul robust que accepta pràcticament qualsevol geometria de manera que s'adapta a la varietat tipològica de casos que ens podem trobar en arquitectura sense col·lapsar. El sistema també permet resoldre qualsevol d'aquests casos de forma integral, com a conjunt, i el conjunt s'entén com tots aquells elements en els quals els seus camps de força s'afecten mútuament. D'aquesta manera, pot ajudar a coordinar els diferents aspectes que tenen un paper en la generació de la volumetria general, i ajudar l'arquitecte a desenvolupar el projecte prenent decisions més que no pas generant geometria. A més d'això, ha demostrat que té una gran capacitat d'optimització sobre el model i millora i resol aspectes geomètrics extremament complexos. Pel que fa al control de la forma, també ens permet visualitzar errors amb molta facilitat i treballar considerant marges d'error cosa que ens pot ajudar a ajustar formes complexes amb molta més facilitat. Per altra banda, però, els resultats mostren encara una certa manca de control que fa difícil ajustar-los perfectament, i en aquest sentit cal un desenvolupament més gran dels mecanismes de regulació dels camps de força i les estratègies de treball perquè això no passi.

7.1.4 Inclusió de la lògica constructiva

Derivada dels sistemes d'optimització apareix una propietat que neix de la capacitat d'incloure mecanismes intel·ligents de modificació del disseny que fan que aquest compleixi una condició constructiva concreta. Una de les funcions dinàmiques més bàsiques que manté una relació més directa amb la lògica constructiva és la funció del pla, que manté tot un seguit de partícules situades sobre el mateix pla. Aquesta funció permet assegurar que els plans no agafin curvatura en cap sentit.

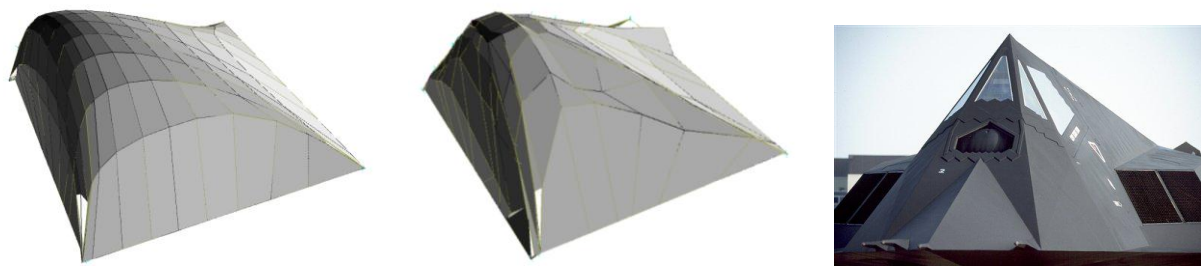


Fig. 176. Desenvolupament d'una malla formada de pannells plans. A la part esquerra es veu la malla original, al mig la malla després de donar prioritat a les forces del pla, que dona peu a una facetació de la forma. A la dreta es veu un model avió espia que ha arribat a una solució similar.

En aplicar-se al conjunt del model fa que aquests es puguin construir com un trencaclosques de peces planes, independentment de la forma del model. La part més interessant d'aquesta funció no és només l'efecte a petita escala que té sobre els pannells, sinó l'efecte que té en el conjunt del model, que realitza modificacions globals que afecten el disseny de la figura sense perdre'n la intenció. El fet de forçar la planicitat de les cares fa que el sistema busqui contínuament una solució en la qual hi hagi la mínima tensió possible deguda a aquesta força. Això no es limita a modificar els pannells particulars, sinó que s'escampa per tot el model i el modifica en el seu conjunt; així, el que acabem obtenint és una versió de cares planes del nostre model per complicat que sigui. És ben curiosa la gran semblança que tenen els models que han estat sotmesos a aquest procés amb alguns dissenys militars, que per qüestions d'indivisibilitat al radar i limitacions de computació van recórrer a la facetació de la forma. Aquesta facetació del model és un resultat que podem obtenir en aplicar la funció de cares planes i presenta avantatges constructius importants sobre les formes amb curvatura.

Un altre tipus d'optimització que podem fer servir amb sistemes dinàmics és la panel·lització de superfícies. Aquest procés molts cops implica que les peces siguin planes i iguals entre elles. En el programa podem fer servir el sistema que permet fer peces iguals a partir d'un seguit de plans diferents. Així, per una banda la malla està lligada a una NURBS i, per l'altra, a una funció que manté els pannells iguals de manera que es debat entre dos pols. Però per altra banda la malla i la funció d'igualtat dels pannells depenen mútuament l'una de l'altra, mentre que la superfície lliure no canvia. El problema principal en intentar-ho fer es troba en el fet que les superfícies es poden definir de dues maneres: bé controlant-ne la forma, o bé definint la forma dels pannells que les componen, però quan definim totes dues condicions alhora estem definint dos cops la mateixa superfície de manera diferent. Tot i que el sistema anirà modificant la forma dels pannells per intentar que encaixin amb la superfície, si aquestes dues definicions no es poden fer compatibles entre elles el sistema no pot resoldre el problema i queda sense una

solució viable. La major part de formes lliures presenten aquest cas, i el sistema intenta ajustar i resoldre un problema que no té cap solució viable. A partir d'aquí hi ha diverses opcions, o bé donar un cert marge respecte a la superfície lliure de manera que la malla es pugui adaptar, o bé augmentar la densitat de la malla. Per altra banda, la condició d'igualtat dels panells és una condició molt poc flexible, no podem donar un resultat aproximat, només un resultat estricte és admissible. Cal entendre, doncs, que per definir una superfície o bé escollim el tipus de peça o bé la forma de la superfície, però no totes dues condicions alhora. Si forcem totes dues condicions llavors obtindrem un resultat amb uns marges d'error massa grans. Tot i que ja plantejem algunes solucions a aquest problema de moment encara és poc funcional.

En conclusió, podem preveure que en afegir qualsevol funció dinàmica que resolgui un problema constructiu el seu efecte no es reduirà únicament a les peces individuals, sinó que es farà extensiu a la totalitat del model i, per tant, n'afectarà el disseny. Curiosament, en aquest procés no es perd la forma inicial de projecte sinó que es corregeix, s'adapta a la condició constructiva especificada. Això té un gran valor com a eina de disseny perquè podem fer intervenir diverses condicions constructives sobre una forma lliure i esperar a veure quin és el resultat que les satisfà totes d'una manera més coherent. La transformació es pot considerar intel·ligent en el sentit que és capaç de coordinar alteracions en tot el conjunt seguint requisits que poden ser relativament complexos, millorant el model inicial i donant la capacitat al sistema de fer propostes de disseny vàlides a partir del model que facilita l'usuari. Això pot fer formes constructives que fins ara eren impensables i, en general, pot ajudar els arquitectes a explorar noves alternatives als dissenys tradicionals d'una manera econòmicament assequible. Però també té algunes contrapartides ja que com que el sistema admet qualsevol problema geomètric no ens avisa quan aquest no té solució, de manera que no sempre és capaç de resoldre els problemes plantejats i cal un cert esforç per part de l'usuari per comprendre que el problema plantejat no té solució i que per això el programa no la troba.

7.1.5 Capacitat per fer esbossos amb eines digitals

Aquesta capacitat d'incloure lògiques constructives també es pot convertir en un sistema de disseny si apliquem els camps de força seguint criteris formals o de programa funcional que ens permeten definir un model de forma gradual. Una de les principals limitacions que tenen els sistemes de CAD actuals és que trenquen el procés de disseny de l'edifici.¹⁸⁷ Així doncs, hem de

¹⁸⁷ Campbell, D.A., Wells, M., *A Critique of Virtual Reality in the Architectural Design Process*, 1994, HITLab Tech Report R-94-3 Seattle: University of Washington, Human Interface Technology Laboratory.

començar els nostres projectes en un medi físic i després passar-los a un medi digital, que té una lògica de dibuix i representació completament diferent. Tal com hem vist, els sistemes dinàmics han obert la porta per formular un procés de disseny sobre una plataforma digital perquè ens permet generar un model que es pot definir de manera gradual, generant múltiples variants i ajustant cada cop més el resultat, de manera que el que fins ara era l'esbós manual troba un equivalent digital. El concepte amb què es va aproximant el resultat és diferent al que es feia fins ara ja que no seguim un procés de dibuix, sinó un procés dinàmic en el qual generem i ajustem camps de força fins a obtenir un model tridimensional definitiu el qual desenvoluparem en un projecte tècnic.

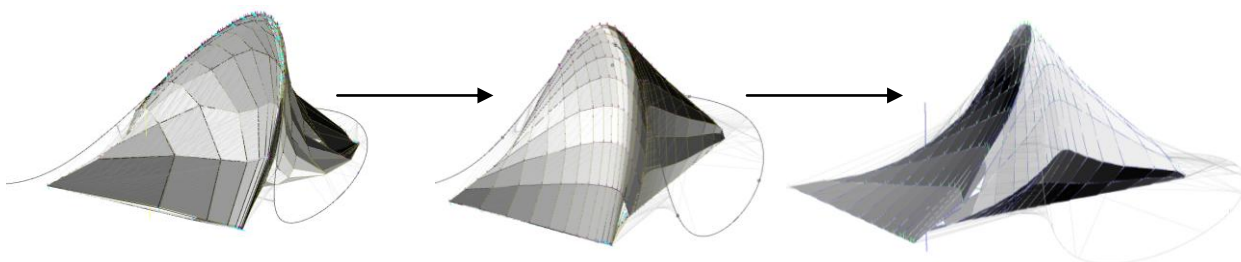


Fig. 177. Procés de disseny d'un model des de l'estat inicial (esquerra) fins a la solució (dreta), en el qual s'han assolit una sèrie d'objectius pel que fa al disseny i la geometria. Partim d'una idea inicial relativament lliure i l'anem desenvolupant fins a obtenir un element constructiu.

En aquest sentit, és important que el model tingui la capacitat de modificar-se àgilment i que gràcies a això pugui tenir lloc un procés de prova i error. Cal esmentar que els sistemes dinàmics en temps real també s'apliquen en altres investigacions com a possible via de solució per a la inclusió dels processos generatius d'arquitectura en el medi digital. En aquest sentit, s'estan fent progressos en el disseny automàtic de plantes que apunten en la mateixa direcció que la present tesi en remarcar la necessitat que el model es modifiqui mentre l'usuari va prenent les decisions ¹⁸⁸ i, en alguns casos, això està molt relacionat amb les fórmules físiques.¹⁸⁹ Per tant, es pot veure que les raons que justifiquen l'ús de sistemes dinàmics en el procés generatiu arquitectònic són diverses. En resum, el sistema dinàmic és capaç d'aproximar un model per mitjà d'un procés gradual de definició tot modificant-lo seguint una lògica indicada per l'usuari. Això inevitablement ens porta a la idea de l'esbós, que comença com un element indefinit que a poc a poc es defineix a mesura que la nostra idea es perfila. Per altra banda, el ventall quasi infinit de solucions que pot oferir i la versatilitat del sistema fa que les possibles solucions que obtinguem puguin ser completament inesperades, de manera que pot donar peu a un procés d'innovació.

¹⁸⁸ <http://aedasresearch.com>

¹⁸⁹ Arvin, S.A., *Physically based mechanical metaphors in architectural space planing*, 2005, Texas A&M University.

7.2 Altres observacions

En parlar de les observacions paral·leles que han aparegut a la tesi és important fer notar que el procés de programació obliga a transformar una formulació teòrica en un element funcional, i en aquest procés tenen lloc fenòmens que ajuden a reestructurar les idees, desmentir falses premisses i descobrir noves aplicacions. D'aquesta manera, qualsevol contradicció interna o error en el plantejament inicial es fa evident i dóna lloc a un procés d'autocorrecció en el qual un pot veure per si mateix si entén adequadament allò que exposa i quins principis en regeixen el funcionament. En aquestes comprovacions cal tenir en compte aspectes molt concrets del procés de modelatge i dels resultats que se n'obtenen per poder-ne extreure conclusions que siguin realment significatives. En conjunt, donen una visió àmplia i completa del problema que permet conèixer la realitat del que exposem. En aquest sentit apareixen molts imprevistos, canvis de punt de vista, reestructuració dels conceptes i altres fenòmens que val la pena esmentar i que a continuació exposem en diversos apartats.

Bàsicament, han aparegut dos ramificacions inesperades de la investigació derivades del desenvolupament del programari que han donat una nova apreciació del problema. Per una banda, aspectes tècnics que posen de relleu la importància de ser capaç de manipular processos; per l'altra, les remarcables similituds amb algunes formacions naturals que es poden arribar a obtenir fent servir aquest sistema.

7.2.1 Integració de la computació com a eina de CAD a partir de sistemes dinàmics

En realitat, després de treballar un cert temps desenvolupant el programa d'aquesta tesi, ens vam adonar que els sistemes dinàmics van en la mateixa línia en què ja apunten molts altres programes, que és aprofitar la capacitat de càlcul dels ordinadors com a eines de treball en CAD. En aquest cas, les funcions dinàmiques són eines bàsiques a partir de les quals podem reproduir una gran varietat de processos, de la mateixa manera que fem servir les línies i les corbes d'un programa CAD per generar dibuixos. Aquest plantejament comporta diferències molt profundes amb els sistemes de CAD convencionals, que ens obliguen a pensar el projecte de manera diferent. Per poder-ho fer de manera eficaç s'han aprofitat tres propietats fonamentals de les simulacions físiques:

1. Són sistemes que poden establir una comunicació fluida en la qual l'usuari pot comprendre de manera transparent el procés de transformació. Si bé això té un límit que

varia segons la complexitat del model, en altres mecanismes els processos de transformació, fins i tot els més senzills, no es poden entendre si no és amb el codi davant. Això comporta que la pantalla de dibuix passi a ser part activa en el sistema de generació dels processos en comptes de quedar reduïda a un simple visor (com en els sistemes actuals de programació tova) i, per tant, eliminar la dependència d'altres mecanismes de pantalles auxiliars, editors de codi, etc.

2. Permeten aprofitar el potencial de càlcul a través de mecanismes genèrics que es poden combinar entre si per donar lloc a processos més complexos. Aquesta combinació es dona de manera natural i previsible en la major part dels casos i no requereix d'una programació específica per fer-ho compatible. També és capaç d'aproximar la solució més idònia a problemes impossibles de formular matemàticament i, per tant admet qualsevol problema geomètric sense col·lapsar.
3. Pot actuar en temps real mentre l'usuari treballa. Altres sistemes com els algorismes genètics o molts mètodes de fórmula directa no tenen aquesta capacitat, de manera que l'usuari no pot participar en el procés.

Això permet acostar l'ús de la computació en el modelatge a l'usuari d'una manera molt senzilla perquè ens obre la possibilitat de crear, en un mateix procés, l'objecte i el sistema dinàmic de control amb una metodologia molt similar a la que hem fet servir en els sistemes de CAD. Veiem, doncs, que la computació entesa com a camps de força que actuen sobre un model permet fer-ne un ús sistemàtic, que pot imitar de manera gràfica el que programes de modelatge molt avançat han de fer amb paràmetres escrits. No obstant això, encara hi ha limitacions molt importants en aquest sistema que n'impedeixen una major profusió i que cal esmentar:

1. No podem generar ni destruir geometria amb sistemes dinàmics, només la podem reorganitzar i això és un clar desavantatge respecte d'altres sistemes que estan més orientats a la programació.
2. És relativament difícil plantejar una interfície que permeti aprofitar totes les possibilitats del sistema. Tot i que no és incompatible amb els mètodes d'interfície actuals, el seu potencial es veu molt limitat si no es planteja cap millora gràfica. En aquest cas, es necessita alguna mena d'innovació que ajudi específicament al control dels camps de força i en permeti explotar tot el potencial.

3. Els sistemes dinàmics no són directament compatibles amb mecanismes de modelatge paramètric com REVIT o ARCHICAD. Això és un desavantatge molt important que cal tenir present perquè, en part, el modelatge avança en aquesta direcció.

Aquests inconvenients no són definitius ja que la versatilitat del sistema dinàmic és suficient com per superar molts d'aquests entrebancs. Per exemple, els sistemes de programació tova que permeten generar tota mena de formes es poden combinar amb aquest mecanisme de manera que tots dos universos formals es puguin alimentar mútuament. Per altra banda, la interfície és un problema difícil però no impossible, fins i tot pot ser que es trobin solucions extremament senzilles. En aquest sentit, hi ha hagut diversos exemples amb problemes similars en informàtica que han donat molt bon resultat com, per exemple, el Windows, que no deixa de ser una manera gràfica de presentar la manipulació de la informació en un sistema digital. El problema principal, però, es troba en la incompatibilitat entre els sistemes paramètrics i els sistemes dinàmics, que tot i això no és insuperable. Una possibilitat per superar aquest entrebanc es basa a associar elements paramètrics als objectes bàsics de la funció que són els nodes, les barres, els plans i les NURBS, de manera que el nostre model dinàmic es tradueix immediatament a un model paramètric que es pogués modificar en temps real.

En aquest sentit, l'experiència guanyada amb el programa que ha resultat de la tesi ha estat fonamental per comprendre el significat real que té l'ús de sistemes dinàmics en el modelatge. De manera intuïtiva des del primer moment vam pensar el programa com un sistema polivalent, no valia donar respostes puntuals als problemes de modelatge, calia anar a l'origen del problema i trobar-ne la solució general. Seguint aquest plantejament, i gràcies al fet que les forces es combinen entre si de manera espontània, és possible fer servir combinacions de processos dinàmics per aconseguir les transformacions més peculiars. Per altra banda, no ha calgut, en una primera fase, cap element auxiliar a part del visor principal i aquest s'ha confirmat com l'eina principal de treball encara que seria desitjable algun element auxiliar per manipular les relacions entre elements. Com a conclusió podem dir que el sistema és funcional en un nivell bàsic i, per tant, les característiques principals han deixat de ser matèria d'especulació per esdevenir reals. En aquest sentit, s'obren moltes possibles vies de creixement que requeriran d'estudis més aprofundits en les àrees pertinents.

7.2.2 Similituds amb les formes i processos naturals

Amb l'observació dels resultats s'han pogut notar similituds importants amb alguns fenòmens que tenen lloc a la natura i que molts cops deriven de la capacitat de tractar i resoldre el model com

un tot integral i no únicament com un conjunt de peces aïllades. En aquest sentit, hi ha apreciacions subtils, que neixen de l'experiència repetida en el modelatge amb aquesta tècnica que cal esmentar i que seria bo tenir en compte de cara al treball en arquitectura, perquè algunes d'aquestes observacions es mouen en la mateixa línia de disseny dels arquitectes, entenent l'edifici com un tot integral format per diferents parts que es relacionen entre elles com una entitat. Per altra banda, aquest mecanisme podria donar sortida pràctica i reforçar alguns plantejaments actuals que intenten aplicar els processos naturals a l'arquitectura.¹⁹⁰

7.2.2.1 *Capacitat de concentrar els conflictes per zones*

Una de les propietats més interessants que hem observat en els sistemes dinàmics és la capacitat per traslladar i concentrar les tensions en àrees concretes de manera que els conflictes geomètrics, que es tradueixen en tensions, es poden traslladar lliurement pel model i es poden moure d'una banda a l'altra. És especialment curiós que si intentem resoldre un conflicte forçant-lo, llavors el conflicte es trasllada. Fins i tot pot ser que el sistema es "recolzi" en la tensió generada per aquell conflicte perquè la resta funcioni i si eliminem el conflicte la resta comença a fallar inexplicablement. Aquest fet té lloc de manera habitual quan intentem eliminar els plans que fallen en una superfície de panells. En eliminar els elements més degenerats la resta comencen a fallar, segurament la tensió que aquests elements degenerats generaven permetia mantenir la resta en equilibri i en eliminar-los tot el conjunt s'ha vist afectat. Per tant, té aquesta propietat orgànica de la natura, en la qual tots els elements participen en el funcionament general. Per altra banda, gràcies a la capacitat per vincular problemes geomètrics amb fenòmens estructurals, la geometria pren aquest tractament orgànic i dona lloc a processos que eren molt difícils de preveure sense generar un programa. Això ens pot fer entendre la complexitat que de vegades implica resoldre un problema geomètric en un conjunt d'elements relacionats entre ells ja que no només cal resoldre la forma sinó que, amb el plantejament dinàmic, cal resoldre tot el conjunt. Així doncs, el problema s'aprecia en tota la seva magnitud gràcies a què en realitat tots els problemes estructurals, formals i conceptuals, s'han reduït a variacions d'un únic fenomen. Aquestes apreciacions permeten intuir la forta vinculació que demostren aquestes lleis amb els fenòmens naturals i les formes que n'han derivat, de la mateixa manera que tots els elements estan interrelacionats i formen un tot coherent. Cada element participa en l'equilibri del conjunt i si s'elimina tot el conjunt se'n veu afectat. Gràcies al concepte d'equilibri dinàmic no hi ha res que quedi exclòs del resultat. Aquesta capacitat pot ser especialment útil quan treballem amb formes

¹⁹⁰ Hensel, M., Menges, A., Weinstock, M., *Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, 2006, Architectural Design, volume 76, issue 2.

complexes en concentrar els conflictes principals en zones concretes, que en resoldre-les fan que la totalitat del projecte sigui viable.

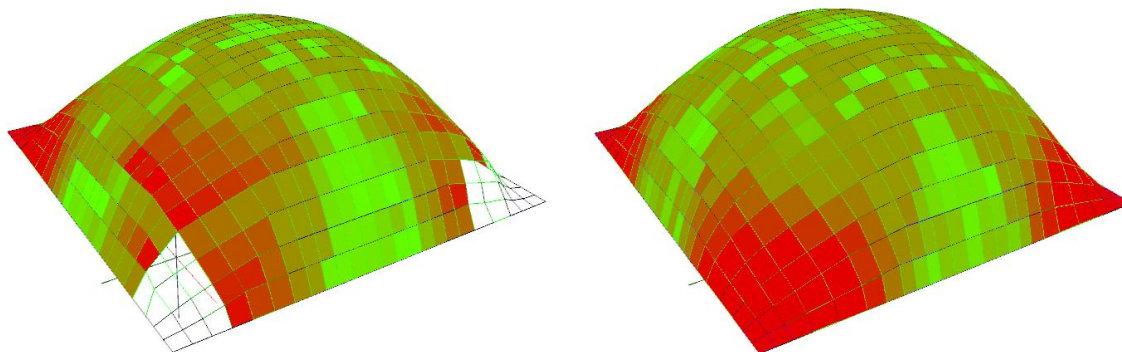


Fig. 178. Podem apreciar com s'ha generat una malla de panells que plantejem com a plans. A la part esquerra, els panells han perdut la planicitat en certes zones conflictives que s'ha concentrat a les vores, com seria d'esperar, però en el moment en què eliminem els panells d'aquestes zones el problema es trasllada i es reproduïx un conflicte similar de menys intensitat just a sobre de l'anterior.

7.2.2.2 *Procés evolutiu*

Hi ha, doncs, una gran semblança entre les forces que actuen a la natura i els processos que tenen lloc a la simulació. Curiosament, tant el procés evolutiu com algunes formacions naturals s'han pogut imitar a partir dels sistemes dinàmics per un fet molt simple, que ja hem esmentat molts cops: la capacitat de buscar una forma que equilibri de manera eficient les tensions externes i internes. Aquest procés també afecta de manera residual l'energia potencial quan actua durant llargs períodes de temps, ja que quan una peça està sotmesa a molta tensió, encara que estigui equilibrada, acostuma a ser més inestable i canvia la configuració buscant un nou estat d'equilibri que es pugui mantenir amb més facilitat. El sistema, doncs, no només busca que les tensions externes quedin en equilibri sinó també que les internes siguin més estables i això dóna peu a un procés de perfeccionament a llarg termini que necessita un càlcul molt precís (i, per tant, lent) per poder tenir lloc. En observar els resultats, tot i que no es pot considerar que el sistema dinàmic sigui un sistema evolutiu, perquè el procés no recombina gens ni pateix cap mena de selecció natural, sí que es pot considerar que la forma evoluciona i busca sempre la major eficiència possible en l'aspecte tensional. És en aquest sentit que el sistema dinàmic es pot considerar un procés evolutiu com a procés de perfeccionament progressiu i general d'un model al llarg del temps. Tot i que la similitud entre tots dos processos pot ser casual, hi ha una raó de fons que és essencial en ambdós casos: tant en l'evolució natural com en el sistema

dinàmic el model canvia contínuament, està sent avaluat contínuament i dóna una resposta diferent contínuament, que intenta equilibrar les tensions i optimitzar la forma.

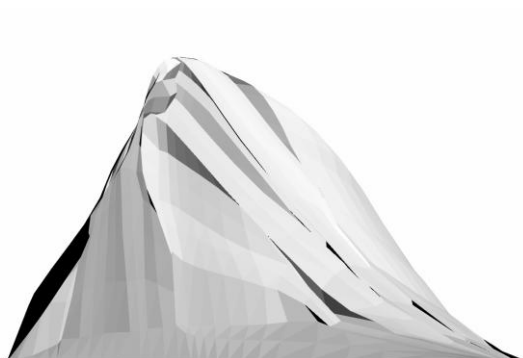
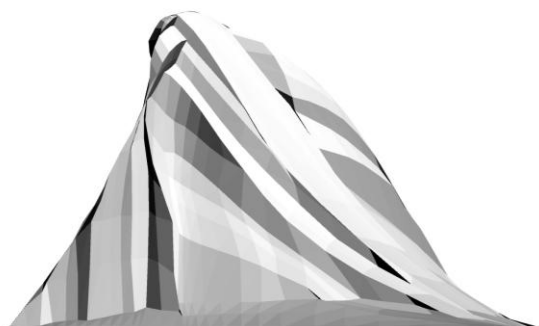
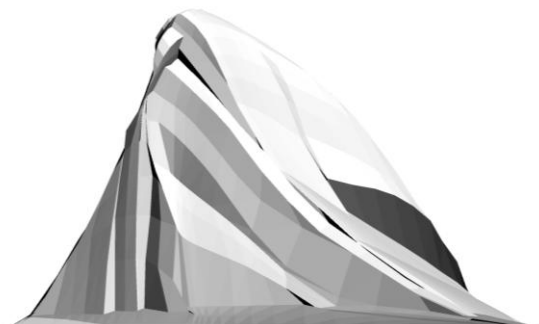


Fig. 179. Evolució de la façana del model en el procés subliminal. Com podem veure, les formes s'han anat perfilant cada cop més i han donat lloc a solucions més òptimes.

Primer model corresponent a 5 minuts de càlcul.



Segon model corresponent a 13 minuts.



Tercer model corresponent a 20 minuts.

Aquest és un mecanisme que ens pot oferir solucions molt més elaborades i complexes que les que obtenim si ens quedem amb el primer resultat que ofereix el sistema en els primers segons. Aquestes solucions, tot i que necessiten més temps, ajusten molt més les propietats del model i aconseguixen un resultat globalment més coherent que afecta les intencions del projecte. L'usuari pot aprofitar aquest procés per perfeccionar un model fins aconseguir la solució òptima per a una situació extremament complexa. Són, doncs, la clau que permet abordar el disseny des dels sistemes dinàmics amb més profunditat.

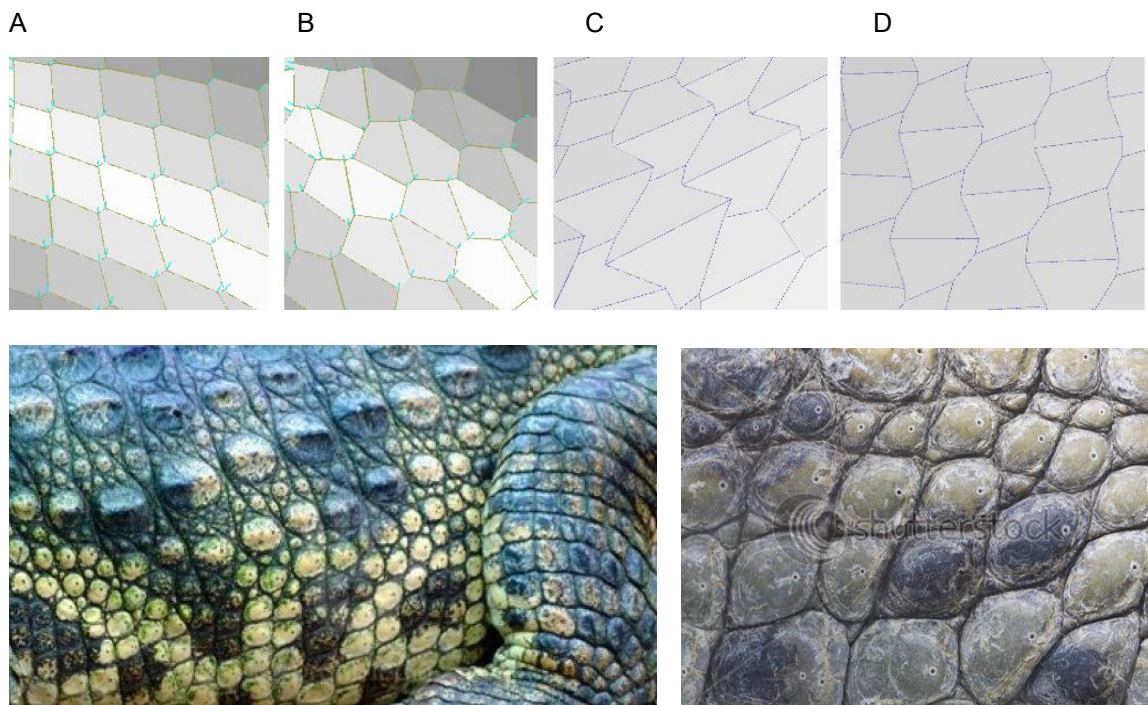
7.2.2.3 *Reproducció de morfologies naturals*

Fig. 180. En el primer cas, hem passat d'una malla de quadrats intercalats a una que tendeix a tornar-se autènticament quadrada. El segon cas, genera pannells hexagonals partits. El tercer i el quart cas donen lloc a malles més similars a escames i que són habituals en el món natural. En general, aquestes últimes configuracions són molt flexibles i permeten les deformacions en diversos sentits.

Un altre cas en el qual trobem exemples que ens permeten defensar la idea que els sistemes de simulació i la natura donen resultats similars, és en els diferents tipus de pannells hexagonals que obtenim en experimentar amb superfícies corbes. En aquests casos, mantenir la planicitat entre elements que es troben en superfícies de doble curvatura dóna lloc a interseccions entre plans que poden arribar a ser molt complicades i a les quals cal sumar la flexibilitat inherent del sistema de malla hexagonal. Llavors, tot el conjunt és capaç de produir solucions d'una gran varietat. A les figures següents posem alguns exemples d'escames que podem trobar a la natura i els comparem amb els resultats del programa en sotmetre malles hexagonals a diferents tipus de tensió. El conjunt de resultats ens ajuden a comprendre millor els elements naturals en deduir que, per exemple, la forma de les escames del cocodril no és casual sinó que respon a un tipus de deformació a la qual es veu sotmesa la seva pell i que segurament es correspon amb la que hem simulat en el programa. Així doncs, en adquirir aquella morfologia la tensió s'ha vist notablement alleugerida i ha donat més llibertat de moviments.

Com es pot veure es formen morfologies de pannells, molt similars a les escames a partir dels mecanismes de relaxació dinàmica, en les quals el model s'adapta per donar lloc a un equilibri de tensions. Poder gaudir d'un sistema que sembla donar resultats similars als que ens ofereix la

natura ens sembla fonamental de cara a millorar el disseny integral de peces en arquitectura. D'aquesta manera, s'obre la possibilitat d'aplicar el concepte d'optimització dinàmica de forma molt més extensa a com ho fèiem fins ara. Ja no parlem únicament d'arcs funiculars o voltes, sinó de la capacitat de tractar qualsevol geometria sotmesa a qualsevol mena de condicionants definits per l'usuari.

7.3 Futurs desenvolupaments

Una de les peculiaritats que tenen les eines digitals és que són com un peix que es mossega la cua, es generen per resoldre unes necessitats però per fer-ho generen unes noves necessitats, de manera que el cicle no queda tancat sinó obert. Aquest procés s'accelera cada cop més. Tot i això, no és un cicle infinit sinó que en realitat aclareix quin ha de ser el paper de les persones i quin ha de ser el paper dels sistemes en un entorn digital de treball, de manera que cadascú tingui el paper que li pertoca i prengui les decisions corresponents. Se suposa que quan les persones trobin el paper adequat respecte al món digital el cicle es tancarà. En aquest sentit, generar un programari ajuda a aclarir quines necessitats reals té el plantejament que un proposa i, per tant, en quin sentit seria adequat desenvolupar-lo.

El programa que hem fet per a la tesi ha estat el primer i, per tant, li ha mancat un plantejament més adequat precisament per ser el primer. De cara al futur volem tornar a fer tot el programa sencer amb un nou plantejament i aprofitar l'experiència que hem adquirit, de manera que els plantejaments futurs van encaminats a poder-los aplicar.

7.3.1 Millores en la interfície gràfica

És important recalcar que gran part de l'esforç, que no s'ha vist reflectit a la tesi, ha consistit a desenvolupar menús i panells de control que ens permetin treballar de la manera més còmoda possible amb el sistema de simulació dinàmica. De les lliçons apreses en el programa es podrien introduir moltes millores que no s'han pogut desenvolupar per falta de temps, però que ens agradaria fer en un futur immediat. Hi ha dos aspectes clau que tenen un paper central en la interfície gràfica del programa. Són els següents:

- L'accés àgil a les propietats dels objectes i els camps de força, essencials per modelar.
- La representació gràfica dels camps de força, essencial per identificar i interpretar el model.

Si es poguessin resoldre ambdós temes d'una manera eficaç es podrien plantejar models extremament complexos i fàcils de manipular. La implementació de millores en tots dos camps ens ajudaria a generar models dinàmics molt més acabats i preparats per al desenvolupament tècnic del projecte. Un avantatge fonamental d'aquest sistema és que podem generar un flux de treball directe des de l'esbós digital al càlcul ambiental o estructural sense sortir de l'àmbit digital. Hem esmentat també moltes vegades a la tesi el concepte dels grafs com un mètode de control més avançat, que permet posar en relació diferents elements d'una manera molt ràpida. Aquest sistema es pot fer servir com a mecanisme de control dels camps de força i ens pot ajudar a integrar o eliminar elements en un camp de força d'una manera eficient. Tot junt pot facilitar la formulació d'un CAD creïble de cara a la feina del disseny arquitectònic i estructural i, fins i tot, d'altres àrees que hi puguin estar interessades. Portar aquesta matèria (la relació amb l'usuari que mantenen els sistemes de CAD) com a matèria d'estudi doctoral seria un pas endavant en la integració dels sistemes digitals en la feina de l'arquitecte, perquè cada cop més aquests aspectes marcaran la diferència entre un bon programari o un mal programari, i això no és un problema superficial sinó un problema bàsic.

7.3.2 Millores en les fórmules

Un altre aspecte que necessitaria més desenvolupament és la correspondència amb la realitat de les fórmules físiques que actuen sobre el model. Cal que aquestes puguin arribar a imitar el comportament real dels objectes amb total precisió i tenir en compte dades de resistència i elasticitat dels materials. Això, com ja hem dit, es pot fer en temps real però requereix d'un estudi detallat dels resultats especialment per veure la capacitat que té el sistema iteratiu per imitar comportaments matemàticament exactes. Si això fos possible, podríem comprovar estructures a mesura que definim el model i treballar simultàniament aspectes molt complexos de l'edifici, cosa que augmentaria considerablement l'eficiència i la coherència dels projectes. Com que el programa no consta de dades de materials no permet visualitzar una deformació real sinó únicament una aproximació. Actualment, la resistència del material depèn en realitat del factor de temps considerat per cada iteració. Es pot augmentar la resistència disminuint aquest factor de temps. L'única conseqüència de fer-ho és que el moviment és més lent, de manera que com més resistència volem donar a un material més precís ha de ser el càlcul i més a poc a poc es desenvoluparà la simulació. Si se superant aquest problema el sistema pot distingir entre traccions i compressions, de manera que es poden establir totes dues resistències amb valors diferents com en el cas de molts materials que resisteixen de manera diferent la tracció i la compressió. Altres problemes tenen a veure amb la pèrdua de resistència dels materials quan

augmenta la longitud de les barres. Un material no es comporta igual a escala microscòpica que a escala macroscòpica, i això vol dir que calen factors de conversió perquè les simulacions siguin correctes. Esperem poder donar aquest pas quan el programa estigui més complet per poder-lo aplicar amb tots els avantatges dels sistemes dinàmics i un total realisme i concordança amb la realitat. Aquesta mena de simulacions realistes en temps real són possibles i ja s'han assajat amb èxit en programes anteriors; s'han obtingut simulacions d'un cert realisme en les quals, segons les dades reals de materials, hem pogut simular com deformen elàsticament, després plàsticament i, finalment, trenquen diferents materials en una estructura rígida.¹⁹¹

7.3.3 Col·lisions

Un altre aspecte que cal desenvolupar en la formulació física és un tractament més profund de les col·lisions que actualment només s'ha tractat en el cas de les partícules, però ni les barres, ni els plans ni les NURBS plantegen col·lisions ni amb les partícules ni amb la resta d'elements. En aquest sentit, si és pogués plantejar aquesta mena de col·lisions en temps real es milloraria la capacitat de treball i la qualitat dels resultats, ja que la col·lisió dels objectes entre ells és un aspecte clau que pot donar molta coherència al comportament i al resultat de la simulació. Com ja hem vist, però, planteja molts problemes amb múltiples solucions que cal avaluar correctament. En aquest sentit, el grau de precisió de les col·lisions és important perquè com més precises són més lenta serà la simulació però més utilitat guanyarà el sistema.

Una possibilitat d'ús per a les col·lisions seria substituir el vent com a força i convertir-lo en un flux de partícules, així obtindríem una simulació capaç de reproduir aspectes que amb una força puntual són difícils de simular si no es fan servir mecanismes de volums finits avançats. Altres avantatges seria detectar col·lisions per a models complexos i, a més, poder-los corregir automàticament. Per exemple, podríem tenir un feix de tubs d'instal·lacions i els fariem passar per un forat rodejat de plans. En moure l'estructura el sistema detecta les col·lisions en temps real i encaixa automàticament els tubs a la nova morfologia.

7.3.4 Desenvolupament dels sistemes de panel·lització

En el camp de la panel·lització els sistemes dinàmics mostren un gran potencial d'aplicació directa. Un cop iniciada l'exploració de la capacitat dels sistemes dinàmics per panel·litzar superfícies, és evident que han demostrat una capacitat excepcional per admetre tota mena de

¹⁹¹ Vegeu l'annex 1.

problemes i proposar-ne respostes. Però encara no s'han explorat totes les possibilitats que ens ofereix aquesta aproximació al problema de la pannel·lització. Per exemple, les possibilitats que dóna la combinació NURBS amb sistemes dinàmics, que és extremament potent, i només és una de les moltes combinacions que podem trobar. Per altra banda, l'eina per generar superfícies de pannels iguals necessita desenvolupar-se més per poder-se aplicar directament a casos reals amb una sortida comercial. Així doncs, aquest sistema pot optimitzar extraordinàriament la confecció de superfícies complexes amb un sistema relativament senzill tal com hem pogut comprovar en les diferents proves que s'han fet a la tesi. Un dels objectius immediats és avançar en aquest sentit i provar eines de pannel·lització que combinin sistemes dinàmics i superfícies NURBS per oferir un sistema de gran potència i versatilitat, que pugui resoldre qualsevol tipus de pannel·lització sobre qualsevol superfície.

7.4 Conclusió

Hem pogut veure aplicacions potencials en l'optimització de pannels, en el procés de disseny, en els sistemes tènsils, en el control de geometries complexes o en el control de la geometria plana. A més, incorporar sistemes de col·lisió i la possibilitat d'incloure la resistència de materials permetrien introduir aspectes de comprovació estructural en el mateix procés generatiu. De l'ús se'n podrien derivar eines que permeten afrontar el procés de disseny d'una manera diferent a com es fa actualment, amb més càrrega tècnica i, al mateix temps, amb una gran llibertat formal. Per altra banda, aquest mecanisme també dotaria les formes resultants de propietats estètiques característiques, la qual cosa és important perquè l'expressivitat no entri en contradicció amb l'optimització. Així doncs, ens trobem amb una estratègia de treball que intenta integrar el procés generatiu al sistema digital de manera que l'usuari no es vegi obligat a canviar de mitjà i perdre, així, coherència en el disseny. En aquest sentit, una de les propietats més interessants d'aquest sistema és que podria permetre unificar el concepte del disseny i optimitzar dues facetes del mateix fenomen.

Per fer-ho possible, es necessita un canvi en l'estratègia general de modelatge que obliga a replantejar certs aspectes clau de la interfície gràfica o les estratègies de treball de cara a fer possibles tots els avantatges esmentats. L'anàlisi de nous sistemes de relació amb l'usuari, com els sistemes de grafs o mètodes gràfics de programació tova, ajudarien a assolir aquestes fites i a augmentar l'aplicabilitat i funcionalitat general del sistema.

En relació amb el context actual, aquestes estratègies es fan servir de manera molt puntual en arquitectura, per a casos concrets, i en general han tingut més difusió en el món de l'animació i l'estudi científic que no pas el modelatge. La tesi ha intentant trencar aquesta visió fent servir aquest mecanisme de manera general, per veure com es comporta en diferents àrees del

modelatge i posar de relleu que aquesta és una possibilitat d'ús real amb aplicacions pràctiques directes en el món de l'arquitectura. Des del punt de vista informàtic, els sistemes dinàmics presenten una manera alternativa d'utilitzar la capacitat computacional com a eina de modelatge en arquitectura, i fraccionar aquesta capacitat en unes funcions bàsiques la combinació de les quals permet crear processos de transformació complexos. En aquest sentit, presenten una gran compatibilitat amb els sistemes de dibuix actuals i amb la capacitat d'interpretació visual de l'usuari, que en faciliten la integració.

En general, de cara al futur cal esperar que apareguin una gran quantitat d'estudis al voltant de l'àmbit digital, que en el nostre cas s'ha encaminat als sistemes de simulació física però que en realitat es podria aplicar a molts altres camps com interfície i relació amb l'usuari, sistemes paramètrics, mètodes de realitat augmentada, optimització de superfícies, algorismes genètics, mètodes de programació tova, etc. Aquests en són alguns exemples i la llista no pararà de créixer en els pròxims anys. Segurament no només afegint algun tema més sinó que també apareixeran múltiples ramificacions de cadascun. En aquest sentit, la tesi ha significat un pas endavant en el desenvolupament d'un d'aquests temes "des de dins" i orientat a l'arquitectura. Fent servir la programació com a eina d'investigació de la forma i de la relació amb l'usuari, s'ha pogut començar a notar la complexitat del que implica l'ús apropiat de l'eina digital per a un arquitecte coordinant factors extremament diversos com la interfície, la programació, el càlcul o la facilitat d'interpretació per part de l'usuari.

També és important incidir en què de cara al futur, si volem fer servir de manera apropiada els sistemes digitals i en volem obrir vies d'investigació, ens caldrà tenir un coneixement més profund que l'actual sobre la programació i la informàtica. Per analitzar qualsevol estratègia o programa digital amb un cert criteri necessitarem obligatòriament tenir coneixements de programació relativament avançats. Tot i que els plantejaments teòrics siguin molt bons, és molt difícil fer un plantejament correcte sense tenir en compte les vicissituds del llenguatge de programació. Per altra banda, hi ha grans possibilitats que no arribem a concebre perquè de vegades ignorem les capacitats del codi. Així doncs, cal atacar el tema des de la base si es vol mantenir un seguiment adequat des de l'arquitectura dels sistemes digitals. A més, un dels pocs camps que no para de créixer en el món actual és precisament la informàtica, que cada cop produeix canvis més sorprenents en la societat i que encara ha de donar grans sorpreses, bones i dolentes, en els pròxims anys. En aquest sentit, cal no perdre el fil d'aquesta tecnologia i, si és possible, ens hem de situar des de la millor perspectiva possible perquè el desenvolupament futur de la nostra professió integri els avenços digitals de la manera més harmoniosa possible i no com un afegit mal encaixat.

8 Referències

8.1 Paraules clau

Form finding, generative design, conceptual design, architectural design, dynamic relaxation, physics simulation, physics animation, physics engine, physics based simulation, particle systems, mass-spring model, force density, tensile structures, panelization.

8.2 Bibliografia

- [1] Kolarevic, B., *Architecture in the digital age · design and manufacturing*, 2003, Taylor and Francis group.
- [2] Jaramillo Jimenez, J.O., *Análisis clásico de estructuras*, 2004, Universidad nacional de Colombia, Unibliblios.
- [3] Terzidis, K., *Algorithmic Architecture*, 2006, Elsevier.
- [4] Woodbury, R., *Elements of parametric design*, 2010, Routledge.
- [5] Pottman, H., Asperl, A., Hofer, M., Kilian, A., *Architectural geometry*, 2007, Bentley institute press.
- [6] Hensel, M., Menges, A., Weinstock, M., *Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, 2006, Architectural Design Volume 76, Issue 2.
- [7] Auer, S., *Realtime particle-based fluid simulation*, 2010, Technische Universität München.
- [8] Serrallonga, J., *Geometria i mecànica en els models de Gaudí*, 2003, ETSAV, Departament d' Estructures a l'Arquitectura, Sant Cugat del Vallès.
- [9] Campbell, D.A., Wells, M., *A Critique of Virtual Reality in the Architectural Design Process*, 1994, HITLab Tech Report R-94-3 Seattle: University of Washington, Human Interface Technology Laboratory.
- [10] Harada, M., Witkin, A., Baraff, D., *Interactive physically-based manipulation of discrete/continuous models*, 1995, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series: 199-208.
- [11] Hamarneh, G., McInerney, T., *Physics-Based Shape Deformations for Medical Image Analysis*, 2003, SPIE-IS&T Electronic Imaging: Image Processing: Algorithms and Systems, vol. 5014, p. 354-362.
- [12] Arvin, S. A., *Physically based mechanical metaphors in architectural space planing*, 2005, Texas A&M University.
- [13] Saad, Y., *Iterative Methods for Sparse Linear systems*, (2000), Standford University.
- [14] Heggie, D., *The Classical Gravitational N-Body Problem*, 2005, arXiv:astro-ph/0503600.
- [15] Chen, H., *Comparative Study of C, C++, C# and Java Programming Languages*, 2010.
- [16] GPU Gems 3, PART V: Physics simulation _ http://http.developer.nvidia.com/GPUGems3/gpugems3_part05.html
- [17] Bork, A.M., i altres, *Introductory computer based mechanics; A one week sample course*, (1968), Commission on College Physics, University of Maryland.
- [18] Terzopoulos, D., Platt, J., Barr, A., Fleischer, K., "Elastically deformable models", (1987), *ACM SIGGRAPH Computer Graphics* Volume: 21, Issue: 4, Publisher: ACM Press, p. 205-214.
- [19] Reeves, W. T., "Particle systems a technique for modeling a class of fuzzy objects", (1983), *ACM Trans. Graph.*, p. 91-108.

Referències

- [20] McInerney, T., Terzopoulos, D., "Deformable models in medical image analysis: A survey", 1996, *Medical Image Analysis*, 1 (2), p. 91-108.
- [21] Mandorli, F., Otto, H. E., Kimura, F., "A reference kernel model for feature-based CAD systems supported by conditional attributed rewrite systems", 1993, *SMA 93 Proceedings of the Second Symposium on Solid Modeling and Applications*, p. 343-354.
- [22] Kagan, P., Fischer, A., Shpitalni M., "Intuitive physically based CAD system for designing os sculptured surfaces", 1996, *CIRP Annals - Manufacturing technology* volume 45, Issue 1, p. 121-124.
- [23] Terzopoulos, D., Qin, H., "Dynamic NURBS with geometric constraints for interactive sculpting", 1994, *ACM Transactions on Graphics* Volume: 13, Issue: 2, Publisher: IK, DTU, p. 103-136.
- [24] Thingvold, J. A., Cohen, E., "Physical modeling with B-spline surfaces for interactive design and animation", (1990), *ACM SIGGRAPH Proceedings of the 1990 symposium on Interactive 3D graphics*, p. 129-137.
- [25] Knabner, P., Tapp C., Thiele K., "Adaptive finite volume discretization of density driven by flows in porous media", 1997, *Transport de contaminants en milieux poreux (support de cours)*, CEA-EDF-INRIA, p. 322-355.
- [26] Koumoutsakos, P., Cottet, G.H., Rossinelli, D., "Flow simulations using particles bridging Computer Graphics and CFD", 2008, *SIGGRAPH '08 ACM SIGGRAPH 2008 classes*, art. n. 25.
- [27] Müller, M., Solenthaler, B., Keiser, R., Gross, M., "Particle-based fluid-fluid interaction", 2005, *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, p. 237-244.
- [28] Stam, J., "Real-time fluid dynamics for games", 2003, *Proceedings of the Game Developer Conference*.
- [29] Fosdick, L.I., "Molecular dynamics: Introduction", 1995, *HPSC Course notes*, January 19, University of Colorado.
- [30] Bourguignon, D., Cani, M.P., "Controlling anisotropy in mass-spring systems", (2000), *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation (EGCAS)*, p. 113—123.
- [31] Phannurat, P., Tharanon, W., Sinthanayothin, C., "Simulation of elastic soft tissue deformation in orthodontics by mass-spring system", 2008, 3rd *International Symposium on Biomedical Engineering ISBME*, 11 nov., p. 247-251.
- [32] Marchal, M., Promayon, E., Troccaz, J., "Simulating complex organ interactions: evaluation of a soft tissue discrete model", 2005, *Proceedings of International Symposium on Visual Computing*. Lecture Notes in Computer Science 3804. Ed. George Bebis et al., p.175-182.
- [33] Wang, Y., Jayaram, S., Jayaram, U., "Physically based modeling in virtual assembly", (2001), *the international journal of virtual reality*, Vol.5, n.1.
- [34] Martin, D. F., Colella, P., Keen, N.D., "An Incompressible Navier-Stokes with Particles Algorithm and Parallel Implementation", 2005, *Parallel Computational Fluid Dynamics: Theory and Applications, Proceedings of the 2005 International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics*, Elsevier, p. 461-468.
- [35] Daniulaitis, V., Alhalabi, M.O., Kawasaki, H., Tanaka, Y., "Medical palpation of deformable tissue using physics-based model for haptic interface robot" (HIRO), 2004, *Intelligent Robots and Systems, (IROS)*. Proceedings. IEEE/RSJ International Conference on, vol.4, n., p. 3907- 3911,
- [36] Mora, R., Bédard, C., Rivard, H., "A geometric modelling framework for conceptual structural design from early digital architectural models", (April 2008), *Advanced Engineering Informatics*. Volume 22, Issue 2, p. 254-270.
- [37] Kilian, A., "Linking Digital hanging chain models to fabrication: Examining the digital practice of architecture", 2004, a *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture and the 2004 Conference of the AIA Technology in Architectural Practice Knowledge Community*. ISBN 0-9696665-2-7. Cambridge (Ontario), p. 110-125. DOI: acadia04_110
- [38] Cottrell, D., Tupper, P.F. "Energy Drift in Molecular Dynamics Simulations", 2006, *BIT Numerical Mathematics* September 2007, volume 47, Issue 3, p. 507-523.

Tesis doctoral - simulacions físiques aplicades a l'arquitectura - Referències

- [39] Kalambi, I.B., "A Comparison of three Iterative Methods for the Solution of Linear Equations", 2008, *J. Appl. Sci. Environ. Manage.* Vol. 12(4), p. 53-55.
- [40] Turing, A.M., "Rounding-off errors in matrix process", (1947), *Q J Mechanics Appl Math* 1 (1): 287-308. DOI: 10.1093/qjmath/1.1.287
- [41] Degen, P., Furrer, H., Jemielewski, J., "Structural analysis and design of a nuclear power plant building for aircraft crash effects", (1976), *Nuclear Engineering and Design* Volume 37, Issue 2, p. 249-268.
- [42] Eymard, R., Gallouet, T., Herbin, R., "Finite Volume Methods", (2000), *Handbook for Numerical Analysis*, Ph. Ciarlet J.L. Lions eds, North Holland, 2000, 715-1022.
- [43] Lee, Y., Terzopoulos, D., Waters, K., "Realistic modeling for facial animation", *SIGGRAPH '95 Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, p. 55 – 62.
- [44] Springel, V., "Smoothed Particle Hydrodynamics in Astrophysics", 2011, *AR44*, 2010, 48, 391.
- [45] Clavet, S., Beaudouin, P., Poulin, P., "Particle-based viscoelastic fluid simulation", 2005, *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, p. 219-228.
- [46] Les, P., "On NURBS: A Survey", *Computer Graphics and Applications*, IEEE, Volume: 11 Issue: 1, p. 55 – 71.
- [47] Glymph, J., Shelden, D., Ceccato, C., Mussel, J., Schober, H., "A parametric strategy for free-form glass structures using quadrilateral planar facets", 2004, *Automation in Construction* 13, 187-202.
- [48] Sahr, K., White, D., Jon, A., Kimerling, "Geodesic Discrete Global Grid Systems", 2003, *Cartography and Geographic Information Science*, Vol. 30, N. 2, p. 121-134.
- [49] WANG, W., LIU, Y., "A note on planar hexagonal meshes", 2010, *The IMA Volumes in Mathematics and its Applications*, Volume 151, p. 221-233.
- [50] Bielak, J., Ghattas, O., Kim, E.-J., "Parallel Octree-Based Finite Element Method for Large-Scale Earthquake Ground Motion Simulation", 2005, *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 10(2):99-112.
- [51] François, C., "Systemics and cybernetics in a historical perspective", 1999, *System research and behaviour sciences*, Syst Res. 16, p. 203-219.
- [52] Bro-Nielsen, M., Cotin, S., "Real-time Volumetric Deformable Models for Surgery Simulation using Finite Elements and Condensation", 1996, *EUROGRAPHICS '96 / J. Rossignac and F. Sillion (Guest Editors)*, Blackwell Publishers, Volume 15, 1996, Number 3, c-57 - c-66.
- [53] Kilian, A., Ochsendorf, J., "Particle-spring systems for structural form finding", 2005, *Journal of the international association for shell and spatial structures* (J. IASS), Vol. 46, No. 2, August, n. 148, p. 77-84.
- [54] Clarke, J.A., Hirsch, J.J., Buhl, W.F., Erdem, A.E., Winkelmann, F.C., "Planned developments in building energy simulation", (July 1986), Proc. of the CIB 5th International Symposium, Bath, England.
- [55] Poschmann, P., Komzisk, L., Mayer, S., "Direct Or Iterative? A dilemma For The User", 1998, *MSC Americas Users' Conference #2698*.
- [56] Peiró, J., Sherwin, S., "Finite difference, finite element and finite volume methods for partial differential equations", 2005, *Handbook of Materials Modeling*. Volume I: Methods and Models, 1-32. Springer.
- [57] Irving, G., Teran, J., Fedkiw, R., "Invertible Finite Elements For Robust Simulation of large deformation", 2004, *SCA '04 Proceedings of the 2004 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, p. 131-140.
- [58] Berger, M.J., Olinger, J., "Adaptive mesh refinement for hyperbolic partial differential equations", 1984, *Journal of Computational Physics* Volume 53, Issue 3, p. 484-512.
- [59] Esward, J., Swam, L., "Fast Collision Detection with an N-Objects Octree", August 1994, CiteSeer Computer and Information Science Publications collection.

- [60] Choi, K.J. Ko, H.S., "Stable but Responsive Cloth", 2005, SIGGRAPH '05 *ACM SIGGRAPH* 2005 Courses, Article No. 1.
- [61] Webster, R., Haluck, R.S., Zoppetti, G., "A haptic surgical simulator for laparoscopic cholecystectomy using real-time deformable organs", 2003, Proceedings of the IASTED International Conference *Biomedical Engineering* June 25-27, p. 219-221.
- [62] Bajaj, C.L., Karlapalem, L.C., "Volume subdivision based hexahedral finite element meshing of domains with interior 2-manifold boundaries", 2006, AFRIGRAPH '06 Proceedings of the 4th international conference on Computer graphics, virtual reality, *visualisation and interaction in Africa*, p. 127-136.
- [63] Bridson, R., Teran, J., Molino, N., Fedkiw, R., "Adaptive physics based tetrahedral mesh generation using level sets", (November 2005), *Engineering with Computers* Volume 21 Issue 1, p. 2-18.
- [64] Benes, B., "Real-time erosion using shallowwater simulation", 2007, *Workshop in Virtual Reality Interactions and Physical Simulation "VRIPHYS"*, p. 43-50.
- [65] Muller, M., Dorsey, J., McMillan, L., Jagnow, R., Cutler, B., "Stable Real-Time Deformations", 2002, Proceedings of the 2002 *ACM SIGGRAPH/Eurographics* symposium on Computer animation, p. 49-54.
- [66] Huerta Fernández, S., "El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí", 2003, *Ingeniería Civil* (130), p. 121-133.
- [67] Bernabeu Larena, A., "Shape design methods based on the optimisation of the structure. Historical Background and Application to Contemporary Architecture", (May 2009), Proceedings of the third international congress on construction history, Cottbus.
- [68] Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmed, D., Tessier, A., Glueck, M., Khan, A., "Physics based generative design", 2009, Publisher: *Les presses de l'université de montréal*, CAAD Futures 2009, p. 231-244.
- [69] McCandlish, D., "Solution to the three body problem by computer", (1973), *American journal of physics*, p. 928-929.
- [70] Tajima, T., Clark, A., Craddock, G. G., Gilden, D. L., Leung, W. K., Li, Y. M., Robertson, J. A., Saltzman, B. J., "Particle simulation of plasmas and stellar systems", (1985), *American Journal of Physics*, Volume 53, Issue 4, p. 365-370.
- [71] Drish, W. F., Wild, W. J., "Numerical solutions of Van der Pol's equation", (1983), *American Journal of Physics*, Volume 51, Issue 5, p. 439-445.
- [72] Terzopoulos, D., "Physically based modeling: past, present and future", (1989), *ACM SIGGRAPH* Computer Graphics Volume: 23, Issue: 5, Publisher: ACM Press, p. 191-209.
- [73] <http://www.mootzoid.com/html/XsiCorner/emFlock.html>
- [74] <http://www.tensinet.com>
- [75] http://mcis2.princeton.edu/swisslegacy/engineers_6.html
- [76] <http://www.formfinder.at/main/downloads/tutorials/>
- [77] <http://tecn.upc.es/wintess/manual/>
- [78] <http://isdl.cau.ac.kr/education.data/numerical.analysis/Lecture2.pdf>
- [79] http://cfd.mace.manchester.ac.uk/twiki/pub/Main/TimCraftNotes_All_Access/ms4-fvreview.pdf
- [80] <http://users.led-inc.eu/~phk/mesh-dualmesh.html>
- [81] <http://labs.cs.sunysb.edu/labs/projects/volume/Papers/Voxel/index.html>
- [82] http://en.wikipedia.org/wiki/N-body_problem
- [83] http://developer.download.nvidia.com/SDK/10/opengl/src/dual_depth_peeling/doc/DualDepthPeeling.pdf
- [84] <http://www.physicsbasedanimation.com/>
- [85] <http://www.thebuzzmedia.com/lagoa-multiphysics-1-0-incredible-new-physics-engine-at-ubisoft/>
- [86] <http://www.digitaltutors.com/training/softimage/ice-tutorials>

- [87] http://download.autodesk.com/global/docs/softimage2013/en_us/userguide/index.html
- [88] <http://lesterbanks.com/2011/05/an-in-depth-look-at-softimage-ice/>
- [89] <http://udn.epicgames.com/Three/PhysXParticleSystemReference.html>
- [90] <http://www.youtube.com/watch?v=KIMJFB0nEho>
- [91] <http://www.homeandlearn.co.uk/csharp/csharp.html>
- [92] <http://www.esri.com/software/cityengine>
- [93] Evolute tools, 2012, <http://www.evolute.at/software/evolutetools-for-rhino.html>
- [94] McNeel, Rhino Labs: PanelingTools for V4, 2012, <http://download.rhino3d.com/Rhino/4.0/PanelingTools/>
- [95] <http://www.cs.rpi.edu/~flaherje/pdf/fea8.pdf>
- [96] <http://en.structurae.de>
- [97] <http://www.yeul.net/Finding%20Form.pdf>
- [98] <http://generativedesign.wordpress.com/2011/12/12/cracking-the-layout-problem/>
- [99] <http://aedasresearch.com>
- [100] <http://www.Grasshopper3d.com/>
- [101] <http://www.mpia-hd.mpg.de/homes/dullemon/lectures/fluidynamics/>
- [102] <http://introcs.cs.princeton.edu/java/assignments/collisions.html>
- [103] <http://www.Grasshopper3d.com/profiles/blog/list?user=1rbtle63jztr0>
- [104] <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/nseqs.htm>
- [105] <http://spacesymmetrystructure.wordpress.com/>
- [106] <http://thiagocosta.net/>

- Annex 1** Simulació basada en un sistema de "mass-spring" en que es tenen en compte resistències reals de materials. La simulació original va tardar prop de 2 minuts, però s'ha accelerat fins a durar menys de 1 segon (temps real) i uns 14 segons (accelerat 8 cops).
- Annex 2** Sistema de control per grafs d'una distribució en planta d'estances quadrades. Tal i com es veu al vídeo a la part esquerra tenim el model dinàmic de les estances, mentre a la dreta tenim el sistema de grafs.
- Annex 3** Diferents vídeos sobre el programa de modelat basat en simulacions físiques:
- *00 Peces iguals.avi*. Generació de plafons iguals a partir d'una malla tensil.
 - *01 Treball malles tensils.avi*. Procés d'elaboració i modelat d'una malla tènsil.
 - *02 Panelitzacio NURBS.avi*. Panel·lització d'una superfícies NURBS.
 - *03 Estructura complexa.avi*. Control d'una estructura complexa.
 - *04 encaix plantes.avi*. Simulació d'un sistema paramètric de control.
 - *05 Panel Peces igual espina peix.avi*. Generació de la configuració en espina de peix per a la coberta de Sta. Caterina.
- Annex 4** Codi principal del programa. Es recomana llegir-lo en "Dream Weaver" o be "Visual Studio" perquè permeten numerar les línies de codi.